

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij rudarstva

**OPTIMIZACIJA PARAMETARA MINIRANJA U SVRHU DOBIVANJA
POVOLJNE FRAGMENTACIJE ODMINIRANE STIJENSKE MASE**

Diplomski rad

Marsel Kolić

R 160

Zagreb, 2017.

OPTIMIZACIJA PARAMETARA MINIRANJA U SVRHU DOBIVANJA POVOLJNE
FRAGMENTACIJE ODMINIRANE STIJENSKE MASE

MARSEL KOLIĆ

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za rudarstvo i geotehniku
Pierottijeva 6, 10 002 Zagreb

Sažetak

Kako bi se smanjila potreba za naknadnim usitnjavanjem stijenske mase, te povećala efikasnost pri drobljenju stijenske mase, potrebno je utvrditi optimalne parametre miniranja kojima utječemo na veličinu i razdiobu fragmenata stijenske mase. Ostvarivanje povoljne fragmentacije odminirane stijenske mase ima izravan utjecaj na povećanje rentabilnosti kamenoloma i površinskih kopova. Fragmentiranje stijene ovisi o strukturnim i fizičko-mehaničkim značajkama stijenske mase prema kojima odabiremo vrstu eksploziva i geometriju bušenja. Za prognoziranje fragmentacije najčešće se koristi Kuz-Ram model, opisan u ovom radu, koji je, zbog svoje jednostavnosti i mogućnosti proširivanja kod različitih situacija miniranja, jedan od najprimjenjivijih modela u inženjerskoj praksi. Za ostvarivanje bolje prognoze fragmentacije koriste se rezultati dobiveni pokusnim sijanjem ili fotografskom analizom fragmentacije stijenske mase kojima se postiže bolje razumijevanje strukturne građe stijenske mase. U radu će biti prikazana usporedba prognozirane fragmentacije Kuz Ram modelom ,te fotografske analize računalnim programom „Wip-Frag“ na primjeru utvrđivanja fragmentacije prilikom probnih miniranja na eksploatacijskom polju tvrtke Cemex Hrvatska d.d. iz Splita.

Ključne riječi: fragmentacija, Kuz-Ram model, miniranje, indeks jednoličnosti, Rosin-Rammlerova razdioba, Swebrec funkcija, WipFrag, faktor stijene.

Diplomski rad sadrži: 44 stranice, 4 tablice, 29 slika i 14 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad
pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, Zagreb

Voditelj: Dr. sc. Mario Dobrilović, izvanredni profesor RGNF

Pomagao pri izradi: Dr.sc. Siniša Stanković, stručni suradnik

Ocjenjivači: Dr. sc. Mario Dobrilović, izvanredni profesor RGNF
Dr. sc. Vinko Škrlec, docent RGNF
Dr. sc. Vječislav Bohanek, docent RGNF

Datum obrane: 27. rujna 2017. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

OPTIMIZATION OF THE BLASTING PARAMETERS IN ORDER TO OBTAIN
FAVORABLE ROCK MASS FRAGMENTATION
MARSEL KOLIĆ

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Mining Engineering and Geotechnics,
Pierottijeva 6, 10 002 Zagreb

Abstract

In order to reduce the need for subsequent blasting of rock mass and increase the efficiency of rock mass grinding, it is necessary to establish optimal mining parameters that affect the size and distribution of rock mass fragments. The realization of favorable fragmentation has a direct effect on the increase of profitability in open pit mines and quarries. Fragmentation of a rock depends on the structural, physical and mechanical characteristics of the rock mass according to which we choose the type of explosives and drilling geometry. For the prediction of fragmentation, the most commonly used Kuz-Ram model, described in this thesis, is one of the most applicable models in engineering practice, due to its simplicity and ability to expand in different minefield situations. For better prediction of fragmentation, the results obtained by sieving or by photographic analysis of rock mass fragmentation are used to achieve a better understanding of the rock mass structure. In this thesis, a comparison of the predicted fragmentation of the Kuz Ram model and the photographic analysis of the computer program "WipFrag" will be presented on the example of fragmentation determination during mining probes on the exploitation field of Cemex Hrvatska d.d. from Split.

Keywords: fragmentation, Kuz-Ram model, mining, uniformity index, Rosin-Rammler distribution, Swabrec function, WipFrag, rock factor..

Thesis contains: 44 pages, 4 tables, 29 figures and 14 references.

Original in: Croatian

Thesis deposited at: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: PhD Mario Dobrilović, Associate Professor

Tech. assistance: PhD Siniša Stanković, Research Associate

Reviewers: PhD Mario Dobrilović, Associate Professor
PhD Vinko Škrlec, Assistant Professor
PhD Vječislav Bohanek, Assistant Professor

Date of defense: September 27th, 2017

SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I ODGOVARAJUĆIH SI JEDINICA	V
1. UVOD.....	1
2. UTJECAJ EKSPLOZIVA NA FRAGMENTACIJU STIJENSKE MASE	3
2.1 Fizičko-mehaničke i strukturne značajke stijenske mase.....	6
2.2 Parametri miniranja	9
3. MODELI ZA ODREĐIVANJE FRAGMENTACIJE STIJENE	17
3.1. Kuz-Ram model.....	17
3.2. Swebrec funkcija	22
4. METODE ZA ANALIZU FRAGMENTACIJE ODMINIRANE STIJENSKE MASE	24
4.1. WipFrag	28
5. PRIMJER UTVRĐIVANJA FRAGMENTACIJE ODMINIRANE STIJENSKE MASE..	32
5.1. Značajke stijenske mase	32
5.2. Parametri minskog polja	33
5.3. Usporedba prognozirane fragmentacije sa fotografskom analizom fragmentacije odminirane stijenske mase računalnim programom „Wip-Frag“.....	36
6. ZAKLJUČAK.....	42
7. LITERATURA	44

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Djelovanje detonacije eksploziva u minskoj bušotini (Škrlec et al., 2014).....	4
Slika 2-2. Prikaz troškova rudarskih operacija u odnosu na fragmentaciju stijene (Strelec, 2001).....	5
Slika 2-3. Prikaz osnovnih veličina za miniranje.....	10
Slika 2-4. Prekratko usporeenje između redova (Božić, 1998a).....	12
Slika 2-5. Pravilno odabrano usporeenje između redova (Božić, 1998a).....	13
Slika 2-6. Prikaz eksplozivnog punjenja unutar minske bušotine.....	14
Slika 2-7. Kombinacija minskih bušotina različitih promjera i duljina (Božić, 1998a)	15
Slika 2-8. Neprecizno izbušeno minsko polje u odnosu na nagib bušotina (Božić, 1998a).....	15
Slika 2-9. Oblik odminirane stijenske mase s rasporedom različito fragmentiranog kamena (Božić, 1998a)	16
Slika 3-1. Orijentacija ploha diskontinuiteta (Strelec, 2001).....	19
Slika 3-2. Korelacija jednoosne tlačne čvrstoće i Youngovog modula elastičnosti za različite vrste stijena (Strelec, 2001)	20
Slika 3-3. Utjecaj koeficijenta jednoličnosti na krivulju fragmentacije (Strelec, 2001).....	22
Slika 3-4. Prikaz usporedbe razdiobe fragmenata Rosin-Rammlerovom i Swebrec funkcijom (Ouchterlony, 2006)	23
Slika 4-1. Različiti oblici fragmenata koji prolaze kroz otvor sita	25
Slika 4-2. Različite veličine istog materijala između međusobno prekrivenih i odvojenih fragmenata	26
Slika 4-3. Automatsko generiranje mreže u softveru WipFrag.....	29
Slika 4-4. Prikaz raspodjele veličine fragmenata.....	31
Slika 5-1. Konstrukcija eksplozivnog punjenja minskih bušotina potpolja 232/1	34
Slika 5-2. Konstrukcija eksplozivnog punjenja minskih bušotina potpolja 232/2.....	34
Slika 5-3. Konstrukcija eksplozivnog punjenja minskih bušotina potpolja 232/3.....	35
Slika 5-4. Konstrukcija eksplozivnog punjenja minskih bušotina potpolja 232/4.....	35
Slika 5-5. Usporedba granulometrijskih krivulja dobivenih prognozom Kuz-Ram modela i fotografskom analizom softvera „WipFrag“ za potpolje 232/1.....	37
Slika 5-6. Usporedba granulometrijskih krivulja dobivenih prognozom KCO modela i fotografskom analizom softvera „WipFrag“ za potpolje 232/1.....	37
Slika 5-7. Usporedba granulometrijskih krivulja dobivenih prognozom Kuz-Ram modela i fotografskom analizom softvera „WipFrag“ za potpolje 232/2.....	38

Slika 5-8. Usporedba granulometrijskih krivulja dobivenih prognozom KCO modela i fotografskom analizom softvera „WipFrag“ za potpolje 232/2.....	38
Slika 5-9. Usporedba granulometrijskih krivulja dobivenih prognozom Kuz-Ram modela i fotografskom analizom softvera „WipFrag“ za potpolje 232/3.....	39
Slika 5-10. Usporedba granulometrijskih krivulja dobivenih prognozom KCO modela i fotografskom analizom softvera „WipFrag“ za potpolje 232/3.....	40
Slika 5-11. Usporedba granulometrijskih krivulja dobivenih prognozom Kuz-Ram modela i fotografskom analizom softvera „WipFrag“ za potpolje 232/4	40
Slika 5-12. Usporedba granulometrijskih krivulja dobivenih prognozom KCO modela i fotografskom analizom softvera „WipFrag“ za potpolje 232/4.....	41

POPIS TABLICA

Tablica 5-1. Značajke intaktnog materijala	32
Tablica 5-2. Strukturne značajke stijenske mase	33
Tablica 5-3. Značajke stijenske mase	33
Tablica 5-4. Minersko-tehničke značajke probnih minskih polja	33

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I ODGOVARAJUĆIH SI JEDINICA

Oznaka	Opis	Jedinica
ρ	Volumna gustoća stijene	kg/m ³
σ_c	Jednoosna tlačna čvrstoća	Pa
ε_l	Relativna duljinska deformacija	-
ε_d	Relativna poprečna deformacija	-
E	Youngov modul elastičnosti	Pa
ν	Poissonov koeficijent	-
α	Azimut diskontinuiteta	°
β	Kut pada diskontinuiteta	°
B	Izbojnica	m
S	Razmak minskih bušotina	m
d	Promjer minske bušotine	mm
x_{50}	Prosječna veličina fragmenta	cm
A	Faktor stijene	-
K	Specifična potrošnja eksploziva	kg/m ³
Q_b	Masa eksploziva u bušotini	kg
RWS	Relativna snaga eksploziva prema ANFO eksplozivu	-
R_x	Udio materijala koji prolazi kroz sito	-
x	Veličina otvora na situ	cm
n	Indeks jednoličnosti	-
W	Standardna devijacija točnosti bušenja	m
L	Duljina eksplozivnog punjenja	m
H	Visina etaže	m
x_{max}	Maksimalna veličina fragmenta	cm
b	Parametar oblika krivulje	-
P	Sustavna pogreška	-

1. UVOD

Veličina fragmenata i razdioba veličine fragmenata stijenske mase su bitni parametri u rudarstvu, graditeljstvu i proizvodnji agregata. U proizvodnji drobljenih agregata, ovi parametri moraju odgovarati zahtjevima kupaca, kako bi našli svoju primjenu u graditeljstvu, npr. pri izradi asfalta i tucanika, za proizvodnju betona, pri gradnji nevezanih cestovnih nosivih slojeva i brojnih drugih primjena. U rudarstvu, veličina i razdioba fragmenata utječe na sve procese rudarskih operacija, a ne samo miniranja stijenske mase. Pravilnim i stručnim izvođenjem rudarskih radova pri miniranju mogu se ostvariti velike uštede pri ostalim rudarskim operacijama, kao što su sekundarna usitnjavanja materijala, utovar i transport materijala, te manja potrošnja energije pri drobljenju mineralnih sirovina. Stoga se teži dobivanju tražene veličine fragmenata i njihove razdiobe kroz primarno fragmentiranje, te što manjoj potrebi sekundarnog usitnjavanja mineralnih sirovina.

Poznavanjem geologije i petrologije stijenske mase, kao i zakonitosti mehanike stijena, te suvremenih tehnika mjerenja, moguće je ostvariti povoljno fragmentiranje odminirane stijenske mase, te na taj način izbjeći nepotrebne troškove. Iako fragmentacija u najvećem dijelu ovisi o strukturi i raspucalosti stijene, izborom parametara miniranja moguće je dobiti materijal povoljne granulacije, a shodno tome, i manje troškove ostalih operacija u rudarstvu, te povećanje rentabilnosti na površinskim kopovima i kamenolomima.

Znanstvenici na području tehnologije miniranja naglašavaju kako je utjecaj diskontinuiteta stijenske mase dominantniji od utjecaja eksploziva. Stoga je nužno provesti detaljnu analizu kako bi se ustvrdili položaji, raspored i gustoća diskontinuiteta, kako bi što bolje iskoristili energiju eksploziva te poboljšali fragmentaciju materijala. Kako je problem tehnologije miniranja nedostatak točnih kvalitativnih parametara za određivanje razdiobe veličine fragmenata, najčešće se služimo prognozama temeljenih na empirijskim podacima. Stoga je poseban naglasak dan na prognoziranju i analizi fragmentacije kako bi se što brže i učinkovitije odredila veličina fragmenata i njezina razdioba. Najkorištenije metode za analizu fragmentacije odminirane stijenske mase su određivanje veličine fragmenata sijanjem, te fotografsko određivanje razdiobe fragmenata.

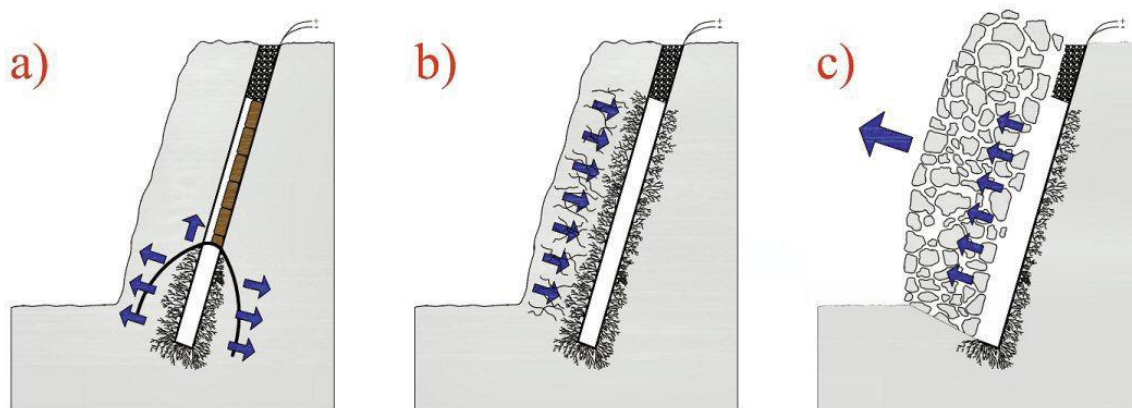
U ovom radu obrađuje se analiza veličine i razdiobe fragmenata pomoću računalnog programa „Wip-Frag“ koji koristi fotografsko određivanje razdiobe fragmenata u odminiranoj masi na temelju Rossin-Rammlerove i Swebrec funkcije. U radu će također biti prikazana usporedba prognozirane fragmentacije Kuz Ram i KCO modelom ,te fotografske analize računalnim programom „Wip-Frag“ na primjeru utvrđivanja fragmentacije prilikom probnih miniranja na eksploatacijskom polju tvrtke Cemex Hrvatska d.d. iz Splita.

2. UTJECAJ EKSPLOZIVA NA FRAGMENTACIJU STIJENSKE MASE

Eksploatacija mineralnih sirovina, kao i izgradnja građevinskih objekata i prometnica, te ostalih objekata u čvrstoj stijenskoj masi najčešće se odvija miniranjem. Za dobivanje kvalitetnih i zadovoljavajućih rezultata miniranja potrebno je poznavati vrstu stijene i njezine značajke, te prema njima odabrati vrstu eksploziva, način iniciranja i geometriju bušenja. Kako bismo odredili optimalne parametre miniranja i geometriju bušenja za dobivanje što kvalitetnije fragmentacije stijenske mase, a time i povećanje rentabilnosti na površinskim kopovima, potrebno je izvesti kvalitetne simulacije miniranja. Simulacije miniranja pomoću računalnih programa mogu nam pomoći pri određivanju optimalne geometrije bušenja, utjecaju odabranog eksploziva i ostalih parametara miniranja.

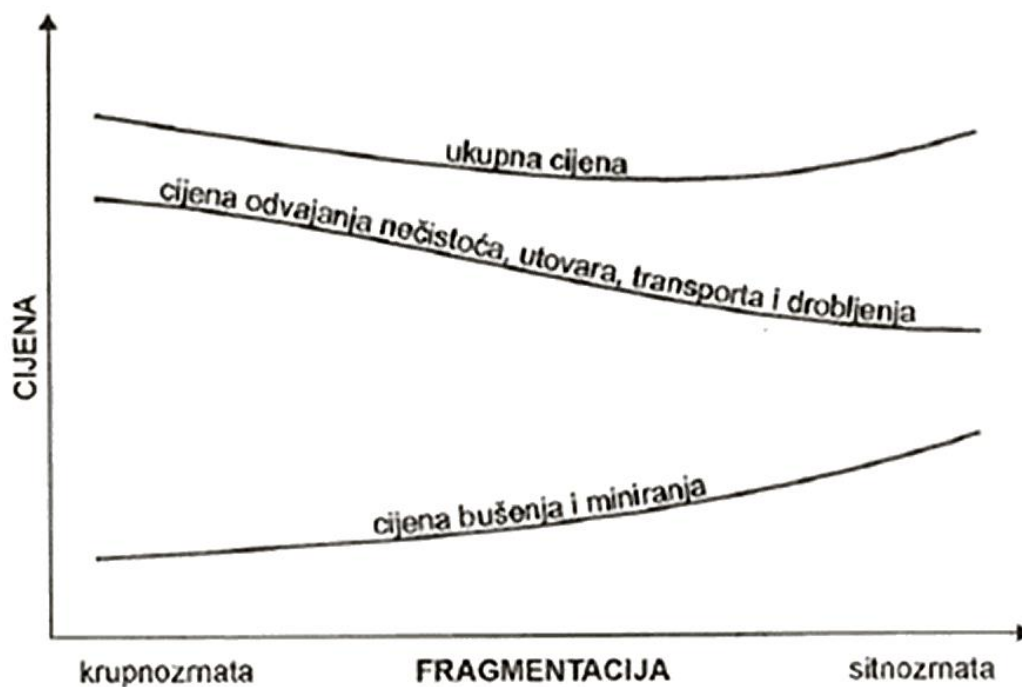
Eksplozivi su nestabilni kemijski spojevi ili smjese koje imaju sposobnost da pod utjecajem određenog vanjskog impulsa detoniraju, razvijajući pritom znatnu količinu plinova i topline (Krsnik, 1989). Detonaciju eksploziva karakterizira velika brzina oslobađanja energije i topline uz djelovanje plinova pod visokim tlakom. Tlak koji se stvara detonacijom mora biti veći od tlačne čvrstoće stijenske mase kako bi došlo do lomljenja i drobljenja stijene u okolini minske bušotine. Energija koja nastaje detonacijom eksploziva dijeli se na udarnu energiju i energiju plinova. Udarne energije uzrokuje intenzivno drobljenje stijene te nastajanje i širenje pukotina u stijenskom materijalu. Energija plinova uzrokuje nastavak širenja pukotina, te naposljetku kretanje stijenske mase prema slobodnoj površini. Postupak miniranja koristi energiju eksplozije koja u većem dijelu služi za razaranje i drobljenje stijene ili nekog drugog materijala, dok se manji dio pretvara u kinetičku energiju seizmičkih i zračnih valova. Na temelju spoznaja o eksplozivnim tvarima i djelovanju energije koju one stvaraju u okolini minske bušotine, postavljeno je više teorija koje opisuju procese miniranja i lomljenja stijene. Sve teorije opisuju četiri međusobno ovisne faze u procesu miniranja (slika 2-1.) koja stvaraju značajna naprezanja zbog kojih dolazi do loma i usitnjavanja stijene (Škrlec et al., 2014):

1. detonacija eksploziva u minskoj bušotini
2. djelovanje tlačnog i vlačnog udarnog vala
3. tlak plinovitih produkata
4. pokretanje izlomljene mase



Slika 2-1. Djelovanje detonacije eksploziva u minskoj bušotini (Škrlec et al., 2014)

Za određivanje troškova dobivanja mineralne sirovine potrebno je uzeti u obzir troškove bušenja i miniranja, naknadnog usitnjavanja, odvajanja nečistoća od mineralne sirovine, utovara i transporta, te drobljenja mineralne sirovine. Uštedama na bušenju i miniranju moguće je prouzročiti velike troškove ostalih rudarskih operacija čime se povećavaju ukupni troškovi pridobivanja mineralne sirovine. Zbog toga se sve veća pažnja posvećuje kvalitetnijoj fragmentaciji materijala jer se shvaća da se primarnom fragmentacijom mogu ostvariti uštede na sekundarnom usitnjavanju i drobljenju mineralne sirovine. Na slici 2-2. prikazan je odnos troškova obrade i fragmentacije mineralnih sirovina. Valja primijetiti da je povećanje stupnja fragmentacije isplativo do određene granice, nakon koje ukupni troškovi opet rastu (Strelec, 2001).



Slika 2-2. Prikaz troškova rudarskih operacija u odnosu na fragmentaciju stijene (Strelec, 2001)

Idealno dobivenom fragmentacijom smatra se ona kod koje nije potrebno izvoditi sekundarna miniranja, a daje rezultate miniranja u skladu sa mogućnostima utovara i transporta, te smanjuje troškove drobljenja mineralne sirovine. Posljedice loše fragmentacije materijala su (Božić, 1998b):

- potreba za sekundarnim usitnjavanjem (sekundarno miniranje ili usitnjavanje hidrauličkim čekićima),
- nepovoljna granulacija materijala koja rezultira nižom cijenom proizvoda,
- otežani utovar i transport odminirane mase,
- skuplje oplemenjivanje mineralne sirovine (veća potrošnja energije pri drobljenju).

Kako bi se navedene posljedice izbjegle, razvijene su metode za prognozu i analizu fragmentacije odminirane stijenske mase, pomoću kojih se, na brz i učinkovit način, vrši korekcija parametara miniranja, te na taj način ostvaruje željena granulacija materijala.

Pri etažnom miniranju, fragmentacija ovisi o (Božić, 1998a):

- geološkom sklopu i inženjersko-geološkim značajkama stijenske mase,
- vrsti eksploziva,
- promjeru minskih bušotina,

- specifičnoj potrošnji eksploziva,
- Rasporedu bušenja minskih bušotina,
- načinu aktiviranja minskih bušotina i
- odstupanju minskih bušotina od projektiranih elemenata.

Značajke stijenske mase imaju veći utjecaj na fragmentaciju stijenske mase od eksploziva korištenog pri miniranju, stoga je vrlo bitno obratiti pažnju na vlačnu i tlačnu čvrstoću stijene, njezinu gustoću, brzinu širenja P-valova, tvrdoću i strukturu. U praksi je dokazano da se stijene s većom čvrstoćom, gustoćom i većom brzinom širenja valova bolje fragmentiraju eksplozivima sa većom brzinom detonacije. Eksplozivima s brzinom detonacije 5000-6000 m/s ostvaruju se povoljniji rezultati pri miniranju granita, mramora i ostalih čvršćih stijena koje imaju brzinu širenja P-valova 4000-7000 m/s, dok su eksplozivi s manjom brzinom detonacije, poput ANFO eksploziva, pogodniji za stijene koje imaju manje brzine širenja P-valova, poput pješčenjaka, vapnenaca i dolomita (Strelec, 2001).

Veća specifična potrošnja eksploziva dati će bolju granulaciju odminirane mase, ali isto tako se njenim povećanjem povećava rizik od nekontroliranog razbacivanja odminirane mase. Na fragmentaciju može utjecati i odabir inicijalnog sustava te vremena stupnjeva kašnjenja, odnosno iznos usporenja. Kod korištenja ANFO eksploziva ne preporuča se uporaba detonirajućeg štapina jer on detonira većom brzinom od eksploziva čime smanjujemo oslobađanje raspoložive energije eksploziva. Uz to, detonirajući štapin pri detonaciji razara čep minske bušotine, čime se smanjuje učinak eksploziva na fragmentaciju stijene i uzrokuje izazivanje zračnog udarnog vala. Zbog navedenih negativnih utjecaja detonirajućeg štapina predlaže se uporaba neelektričnog sustava za iniciranje (Nonel). Uz to što otklanja sve negativne utjecaje detonirajućeg štapina, prednosti Nonel sustava su jednostavnost u radu i mogućnost dobivanja velikog broja intervala usporenja, čime se omogućeno zasebno otpucavanje svake minske bušotine (Strelec, 2001).

2.1 Fizičko-mehaničke i strukturne značajke stijenske mase

Veličine o kojima ovise rezultati miniranja određuju se na temelju stijenske mase u kojoj se miniranje odvija i njezinih fizikalno-mehaničkih svojstava. Struktura i tekstura, raspucalost, inženjerskogeološka i hidrogeološka svojstva, te ostali geološki uvjeti stijenske mase imaju velik utjecaj na stupanj drobljenja i dobivanje željene granulacije. Za

izradu projekta miniranja, potrebno je provesti terenska i laboratorijska ispitivanja kako bi se što bolje odredile fizikalno-mehaničke i strukturne značajke stijenske mase koje imaju utjecaj na stabilnost kosine, te na parametre kojima određujemo prognoziranu fragmentaciju stijenske mase. Vrsta stijene, njezina raspucalost, te orijentacija pukotina važni su parametri prema kojima se određuju parametri miniranja i geometrija bušenja u svrhu dobivanja povoljnih rezultata miniranja stijenske mase. Ako je stijenska masa blokovita, tada će fragmentacija stijenske mase ovisiti o vezama između blokova, što znači da će strukturne značajke imati veći utjecaj na veličinu i razdiobu fragmenata od korištenog eksploziva. U slučaju masivne stijene, veličina fragmenata će ovisiti gotovo isključivo o parametrima miniranja, tj. o vrsti eksploziva i geometriji bušenja. Kod istraživanja slojevitosti i pukotina stijenske mase najvažnije je odrediti orijentaciju, razmak i postojanost diskontinuiteta. Ako su slojevi čvrsto vezani, širenje pukotina za vrijeme detonacije neće imati utjecaj na granulaciju stijene. U slučaju otvorenih slojnih ploha sa razmakom manjim od planirane granulacije stijene nije moguće dobiti traženi granulometrijski sastav stijenske mase. Fizikalno mehaničke značajke stijenske mase koje imaju najveći utjecaj na rezultate miniranja su jednoosna tlačna čvrstoća, volumna gustoća stijene, te deformabilnost materijala. Strukturne značajke stijenske mase koje najviše utječu na rezultate miniranja su orijentacija, razmak i postojanost diskontinuiteta, te veličina blokova (Hrženjak, 2009).

Volumna gustoća je definirana kao omjer mase stijene i volumena stijene u prirodnom stanju vlažnosti, uključujući sve pore. Što je veća volumna gustoća stijena, općenito je potrebno više energije kako bi došlo do razaranja stijene. Izraz 2-1 za volumnu gustoću stijene glasi:

$$\rho = \frac{m}{V} \left(\frac{kg}{m^3} \right) \quad (2-1)$$

gdje je:

m - masa uzorka (kg)

V – volumen uzorka stijene (m^3)

Čvrstoća stijene definirana je kao otpor kojeg vanjske sile moraju savladati da bi došlo do sloma stijene, a razlikujemo tlačnu i vlačnu čvrstoću. Kod većine stijena, tlačna čvrstoća je 8-10 puta veća od vlačne. Jednoosna tlačna čvrstoća definirana je kao maksimalno naprezanje pri ispitivanju kod kojeg dolazi do sloma stijene uz dozvoljeno

bočno širenje. Ispitivanje čvrstoće se provodi na prizmatskim i valjkastim uzorcima propisanih dimenzija, a izraz 2-2 za jednoosnu tlačnu čvrstoću glasi:

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \left(\frac{N}{m^2}, Pa, Mpa \right) \quad (2-2)$$

gdje je:

F - sila koja djeluje na uzorak stijene (N)

A - površina uzorka (m^2)

Deformabilnost materijala se provodi mjerenjem dužinskih i poprečnih deformacija pri jednoosnom ispitivanju, a služi za određivanje modula elastičnosti i Poissonovog koeficijenta. Relativna duljinska deformacija jednaka je omjeru razlike duljina i početne osne duljine, a dana je izrazom 2-3:.

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l_o} \quad (2-3)$$

gdje je:

Δl - razlika duljine uzorka prije i poslije deformacije (m)

l_o – početna duljina uzorka (m)

Relativna poprečna deformacija jednaka je omjeru razlike širina i početne širine, a dana je izrazom 2-4:

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta d}{d_o} \quad (2-4)$$

gdje je:

Δd – razlika širine uzorka prije i poslije deformacije (m)

d_o – početna širina uzorka (m)

Youngov modul elastičnosti (E) je definiran kao omjer razlike naprezanja i razlike relativne duljinske deformacije, a dan je izrazom 2-5:

$$E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon_l} (Pa) \quad (2-5)$$

gdje je:

$\Delta \sigma$ - razlika između naprezanja (Pa)

$\Delta \varepsilon_l$ - razlika između relativnih duljinskih deformacija (-)

Poissonov koeficijent definiran je izrazom 2-6 kao omjer između relativne duljinske i relativne poprečne deformacije.

$$\nu = \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_l} \quad (2-6)$$

gdje su:

ε_d – relativna poprečna deformacija (-)

ε_l – relativna duljinska deformacija (-)

Orijentacija diskontinuiteta je prostorni položaj diskontinuiteta definiran azimutom, odnosno smjerom nagiba diskontinuiteta u odnosu na sjever ($0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$), te kutom pada diskontinuiteta β u odnosu na horizontalnu ravninu ($0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$).

Razmak diskontinuiteta definiran je kao okomita udaljenost između ploha diskontinuiteta koji pripadaju istoj porodici. Razmak diskontinuiteta u razlomljenoj stijenskoj masi uvjetuje veličinu fragmenata unutar odminirane stijenske mase. U stijenskoj masi sa malim razmacima pukotina potrebna je manja količina energije eksploziva za razaranje stijene.

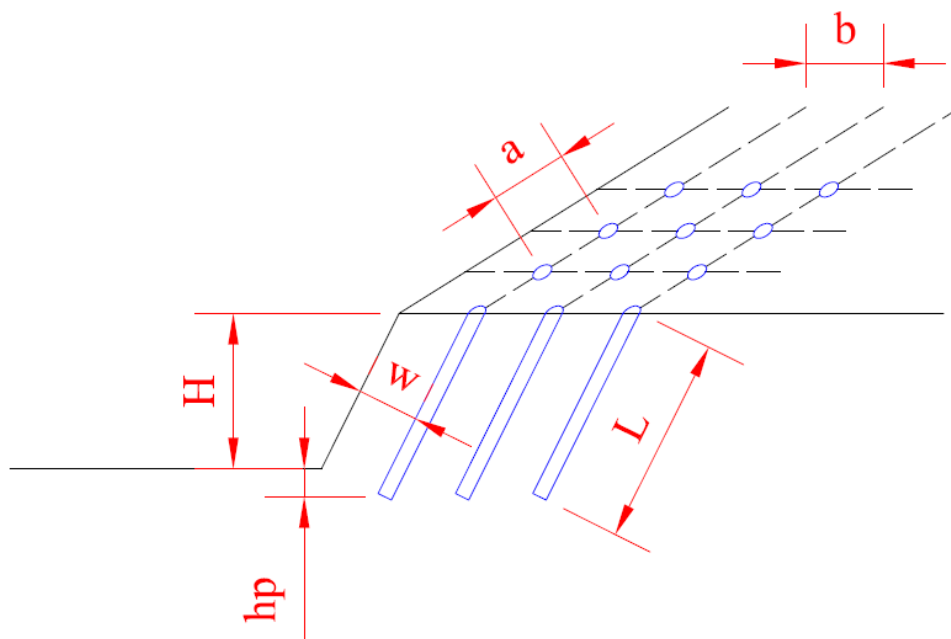
Postojanost diskontinuiteta predstavlja prostiranje diskontinuiteta kao ravnine. Što je veća postojanost diskontinuiteta, to je on opasniji po pitanju stabilnosti. Prekidi diskontinuiteta u stijeni najčešće ukazuju na veću čvrstoću diskontinuiteta.

Veličina bloka je parametar određen brojem porodica diskontinuiteta, postojanošću i razmakom diskontinuiteta. Oblik bloka je određen orijentacijom, razmakom i brojem porodica diskontinuiteta.

2.2 Parametri miniranja

Poznavanje minersko-tehničkih parametara eksploziva korištenog za miniranje, kao i strukturu, te fizikalno-mehanička svojstva stijenske mase je temeljni uvjet za kvalitetno određivanje osnovnih veličina miniranja (slika 2-3.) u koje spadaju (Božić, 1998a):

- linija najmanjeg otpora (izbojnica),
- razmak minskih bušotina,
- vrsta eksploziva i eksplozivni naboj,
- visina etaže,
- promjer minskih bušotina,
- nagib minskih bušotina.



Kazalo:

a – razmak između bušotina, (m),

b – razmak između redova bušotina (m)

w – izbojnica (m)

L – duljina bušotine (m)

H – visina etaže (m)

h_p – probušenje (m)

Slika 2-3. Prikaz osnovnih veličina za miniranje

Linija najmanjeg otpora (izbojnica) je najkraća udaljenost od slobodne površine do središta eksplozivnog naboja pri dnu minske bušotine (Krsnik, 1989). Veličina izbojnice ovisi o:

- vrsti eksploziva,
- koncentraciji eksplozivnog punjenja pri dnu bušotine,
- svojstvima stijenske mase,
- razmaku minskih bušotina i redova,
- probušenju,
- stupnju uklještenja.

Za proračun izbojnice, u praksi se najčešće koristi Langeforsov izraz 2-7, a on glasi:

$$B = \frac{d}{33} \sqrt{\frac{g E_g}{s v m}} [m] \quad (2-7)$$

gdje je:

B - izbojnica (m)

d - promjer minske bušotine (mm)

g - gustoća eksplozivnog punjenja u minskoj bušotini (kg/dm^3)

E_g - relativna snaga eksploziva za glavni eksplozivni naboj

s - pokazatelj minirljivosti stijene (kg/m^3)

v - koeficijent ukljiještenosti stijene pri dnu minske bušotine

m - koeficijent gustoće minskih bušotina

Kako bi se ostvarila željenu granulaciju materijala, potrebno je pronaći optimalnu veličinu izbojnice. U slučaju premale veličine izbojnice, moguća je pojava razbacivanja odminirane stijenske mase. U slučaju povećane veličine izbojnice, dolazi do nepovoljne granulacije materijala, odnosno, velikog udjela vangabaritnih blokova.

Razmak minskih bušotina ovisi o izbojnici i koeficijentu gustoće minskih bušotina, a dan je izrazom 2-8:

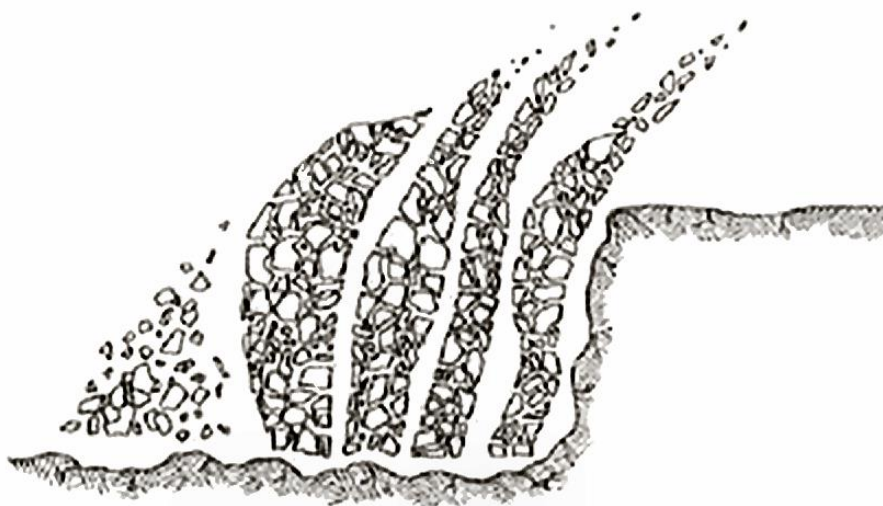
$$S = m \cdot B [m] \quad (2-8)$$

Promjena razmaka ima utjecaj na granulaciju materijala, stoga je bitno odrediti optimalni razmak kako bi granulacija bila povoljna, a razbacivanje materijala neznatno.

Promjer minskih bušotina bitno utječe na fragmentaciju stijenske mase jer izravno određuje i promjer i koncentraciju eksplozivnog punjenja. Što je manja razlika između promjera minske bušotine i promjera eksplozivnog punjenja, postiže se bolje fragmentiranje stijenske mase. Manjim promjerom minske bušotine postiže se sitnija granulacija materijala, no to vrijedi samo ako se radi o otpucavanju samo jedne minske bušotine ili jednog reda minskih bušotina koje otpucavaju trenutno. Razlog tomu je ujednačenija raspodjela energije eksploziva po volumenu stijenske mase, jer veličina promjera, zajedno sa vrstom eksploziva, određuje dubinu bušenja, izbojnicu i razmak minskih bušotina.

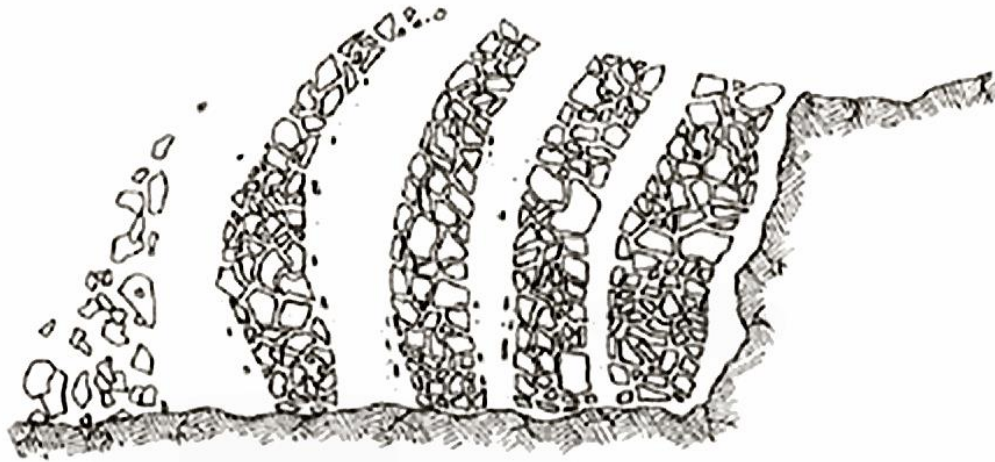
Razlikuju se dva tipa otpucavanja minskih bušotina, a to su milisekundno i trenutno. Trenutno otpucavanje se rijetko koristi iz razloga što na taj način dobivamo krupniju granulaciju odminirane stijenske mase, a i dolazi do povećanja intenziteta

seizmičkih efekata izazvanih takvim načinom otpucavanja. Milisekundnim otpucavanjem postiže se smanjenje seizmičkih efekata miniranja, te povećanje stupnja drobljenja miniranja. Korištenjem milisekundnih usporenja između susjednih eksplozivnih punjenja bušotina, osigurava se dovoljno vremena kako bi svako eksplozivno punjenje drobilo stijensku masu prije nego što sljedeće eksplozivno punjenje detonira. Na taj način svako sljedeće eksplozivno punjenje otpucava s još jednom slobodnom površinom. Vrlo je bitno pravilno odrediti vrijeme usporenja. Ako je vrijeme usporenja između redova minskih bušotina prekratko, u zadnjim redovima dolazi do usmjerenja stijenske mase prema gore, a ne horizontalno, čime se pospješuje nekontrolirano razbacivanje stijene (slika 2-4.). Ako je vrijeme usporenja predugo, također dolazi do razbacivanja stijene, te krupnije granulacije i jakog zračnog udara.



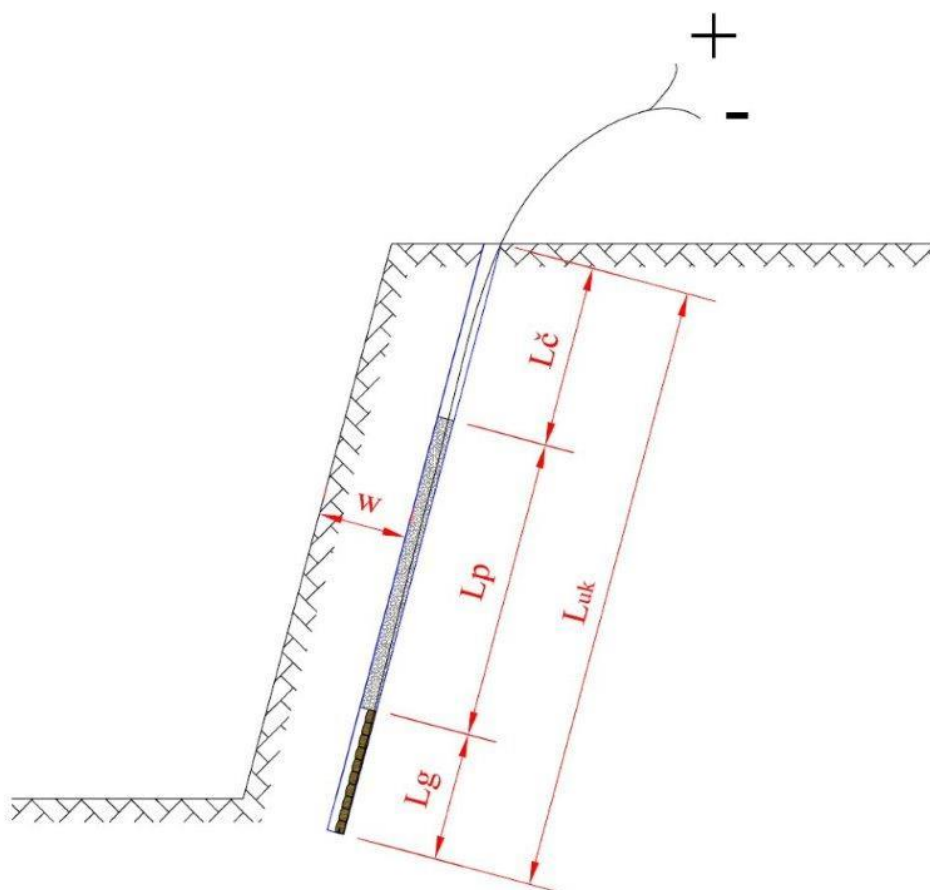
Slika 2-4. Prekratko usporenje između redova (Božić, 1998a)

Pravilno odabrano vrijeme usporenja i pravilan način pomicanja odminirane stijenske mase prikazani su na slici 2-5.



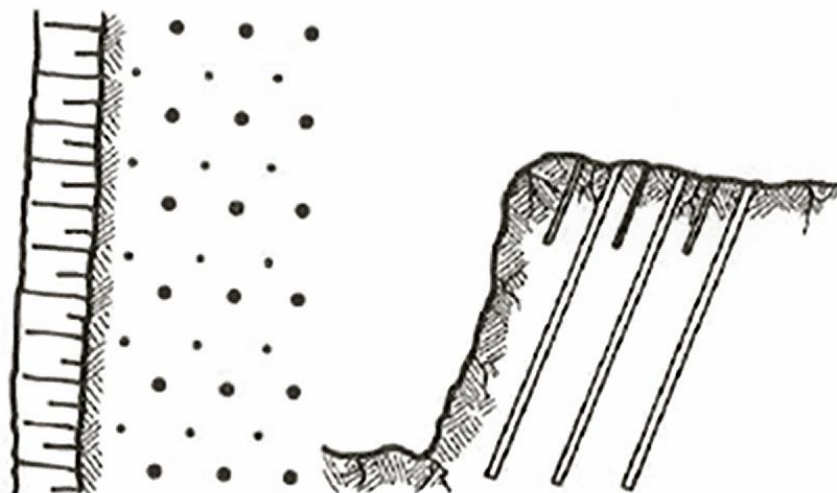
Slika 2-5. Pravilno odabrano usporenje između redova (Božić, 1998a)

Eksplzivno punjenje je određena količina eksploziva smještena u minsku bušotinu opremljena inicijalnim sredstvom. Obzirom na veličinu otpora stijene miniranju, eksplozivno punjenje dijeli se na glavno, koje se najčešće nalazi na dnu bušotine gdje je otpor stijene najveći, te pomoćno, kod kojeg koristimo eksplozive manje gustoće zbog manje veličine otpora stijene. Dio minske bušotine iznad eksplozivnog punjenja nazivamo čepom minske bušotine. Raspodjela eksplozivnog punjenja unutar minske bušotine prikazana je na slici 2-6.



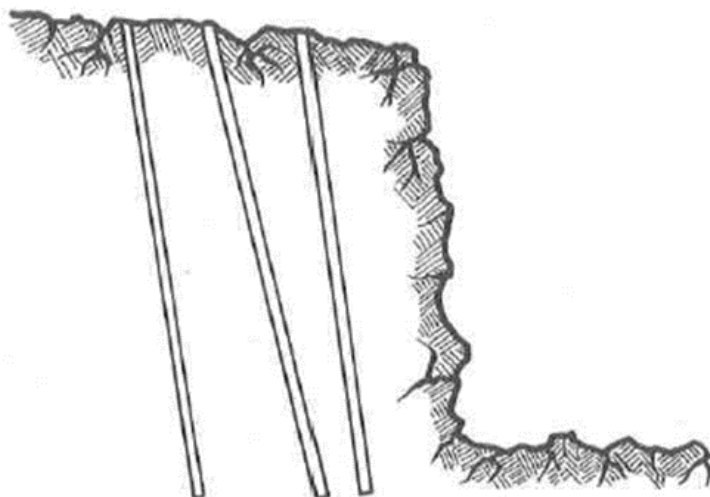
Slika 2-6. Prikaz eksplozivnog punjenja unutar minske bušotine

Čep minske bušotine služi za osiguravanje potpune detonacije eksplozivnog punjenja, te sprječavanje odlaska plinova eksplozije u atmosferu. Duljina čepa ima utjecaj na fragmentaciju i razbacivanje stijenske mase. Povećanjem duljine čepa dobiva se veći udio krupnijih fragmenata, dok se smanjenjem čepa povećava daljina razbacivanja stijenske mase. Kako bi se poboljšala fragmentacija, moguće je smanjiti veličinu čepa u slučaju da u blizini mjesta miniranja nema objekata koje bi mogli oštetiti, ili se mogu postaviti patrone eksploziva unutar čepa. Također, fragmentaciju je moguće poboljšati i bušenjem minskih bušotina manjeg promjera u zoni dubine čepa (slika 2-7.).



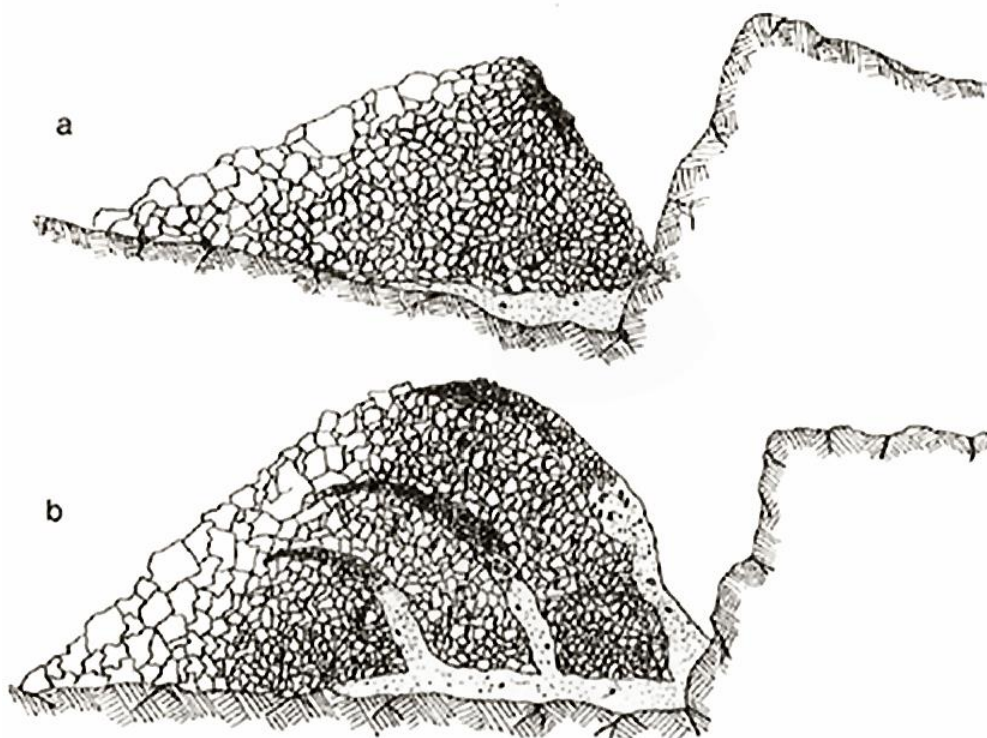
Slika 2-7. Kombinacija minskih bušotina različitih promjera i duljina (Božić, 1998a)

Preciznost bušenja također utječe na fragmentaciju odminirane stijenske mase. Ako su minske bušotine izbušene neprecizno (slika 2-8.), te se ne poklapaju sa projektom miniranja, može doći do krupnije granulacije materijala, kao i nekontroliranog razbacivanja stijene.



Slika 2-8. Neprecizno izbušeno minsko polje u odnosu na nagib bušotina (Božić, 1998a)

Na slici 2-9. prikazan je oblik odminirane stijenske mase kod masovnih etažnih miniranja. Može se primjetiti pojava da su krupniji fragmenti stijene dobiveni iz prvog reda minskih bušotina i iz zone čepa, kao i to da višeredna masovna miniranja daju povoljniju fragmentaciju odminirane stijenske mase od jednorednih.



Kazalo:

a – jednoredno miniranje

b – višeredno miniranje

Slika 2-9. Oblik odminirane stijenske mase s rasporedom različito fragmentiranog kamena (Božić, 1998a)

3. MODELI ZA ODREĐIVANJE FRAGMENTACIJE STIJENE

Veliki broj modela za određivanje fragmentacije stijene nije pronašao bezuvjetnu primjenu u praksi. Ograničenja modela za određivanje fragmentacije stijena očituju se u prevelikom broju ulaznih parametara koji se ne mogu odrediti niti izmjeriti. Neki od modela su previše kompleksni, te je za njihovo korištenje potreban stručnjak iz područja programiranja. Za razliku od takvih modela, Kuz-Ram model je jedan od najprimjenjivanijih modela za određivanje fragmentacije u inženjerskoj praksi zbog svoje jednostavnosti i prilagodljivosti kod različitih situacija miniranja.

3.1. Kuz-Ram model

Kuz-Ram model je od najkorištenijih modela za određivanje fragmentacije. Razlog tome je što su svi parametri poznati i uobičajeni, proračun je relativno jednostavan i može se lako modificirati ili proširiti kod različitih situacija miniranja. Nedostaci modela su nemogućnost stvarnog predviđanja rezultata, nedovoljno poznate karakteristike i vrijednosti stijene, čime se smanjuje pouzdanost modela, te ovisnost rezultata o lokaciji minske bušotine, slijedu detonacije, vremenu otpucavanja i karakteristikama primjenjenog eksploziva (Cunningham, 1987).

Kuz-Ram model je empirijski prikaz razdiobe fragmenata koji primjenjuje Rosin-Rammlerovu teoriju fragmentacije stijenske mase miniranjem. Kuz-Ram polazi od pretpostavke da eksploziv detonira na skoro idealni način, te da su iniciranje i vremenska kašnjenja projektirani ispravno. Kuznetsov rad (1973) pokazuje postojanje veze između srednje veličine fragmentacije i količine TNT eksploziva koji je korišten u određenoj vrsti stijene. Iako srednja veličina fragmenata može biti predviđena, ona ne govori ništa o količini sitnijih čestica ili o količini blokova. Ista srednja veličina vrijedi za jednoliko graduiran materijal i za materijal koji se sastoji od sitnijih čestica i ogromnih blokova. Stvarna veličina raspodjele odminiranih fragmenata je funkcija rasporeda minskih bušotina i načina na koji je eksploziv postavljen u minskim bušotinama u stijeni. Kuz-Ram model koristi Kuznetsovu jednadžbu kojom se može utvrditi srednja veličina fragmenata odminirane stijenske mase, te Rosin-Rammlerovu jednadžbu kojom se prikazuje razdioba veličine fragmenata nakon miniranja. Na Rosin-Rammlerovoj krivulji može se odrediti

jedna točka, tj. srednja veličina, koja je određena pomoću Kuznetsove jednadžbe. Modificirana Kuznetsova jednadžba dana je izrazom 3-1 koji glasi:

$$x_{50} = A K^{-0,8} Q_b^{\frac{1}{6}} \left(\frac{115}{RWS} \right)^{\frac{19}{30}} \quad (3-1)$$

gdje je:

x_{50} - prosječna veličina fragmenata (cm)

A - faktor stijene

K - specifična potrošnja eksploziva (kg/m^3)

Q_b - masa eksploziva u bušotini (kg)

RWS - relativna snaga eksploziva prema ANFO eksplozivu ($RWS_{\text{TNT}} = 115$)

Faktor stijene A ovisan je o gustoći stijene, raspucanosti i Protodakonovom koeficijentu čvrstoće. Cunningham je 1987. godine faktor stijene povezo sa indeksom minirljivosti i konceptom P.A. Lillya, te ga prilagodio Kuz-Ram modelu. Izraz za faktor stijene A dan je obrascem 3-2, te glasi:

$$A = 0,06 (RMD + JF + RDI + HF) \quad (3-2)$$

gdje je:

RMD - opisna vrijednost stijenske mase

- Drobljiva/krhka 10
- Blokovi JF
- Masivna 50

JF - pukotinski faktor

$$JF = (JCF \cdot JPS) + JPA$$

gdje je:

JCF - stanje pukotina

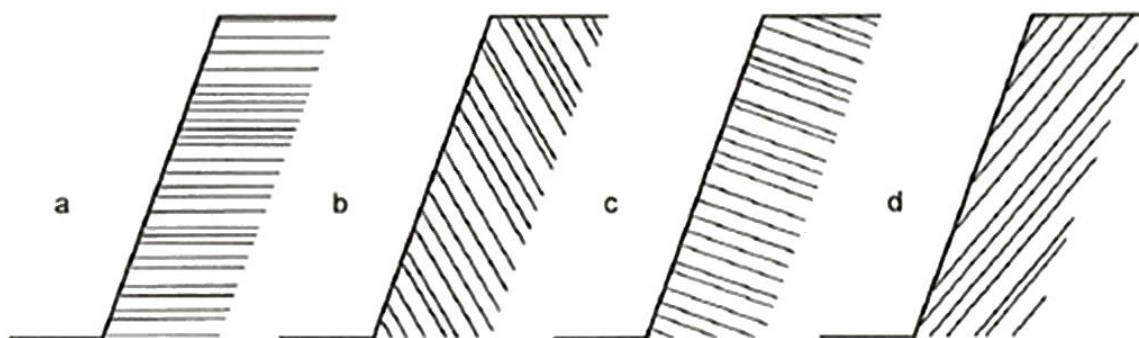
- zatvorene 1
- otvorene 1,5
- ispunjene 2

JPS- vertikalni razmak pukotina

< 0,1 m	10
0,1-1,0 m	20
> 1,0 m	50

JPA- orijentacija ploha pukotina (slika 3-1.):

- Horizontalno	10
- Pad od lica	20
- Okomito na lice	30
- Pad u lice	40



Slika 3-1. Orijentacija ploha diskontinuiteta (Strelec, 2001)

RDI- utjecaj gustoće stijenske mase

$$RDI = (25 \rho) - 50$$

ρ - gustoća stijenske mase (t/m^3)

HF- faktor čvrstoće

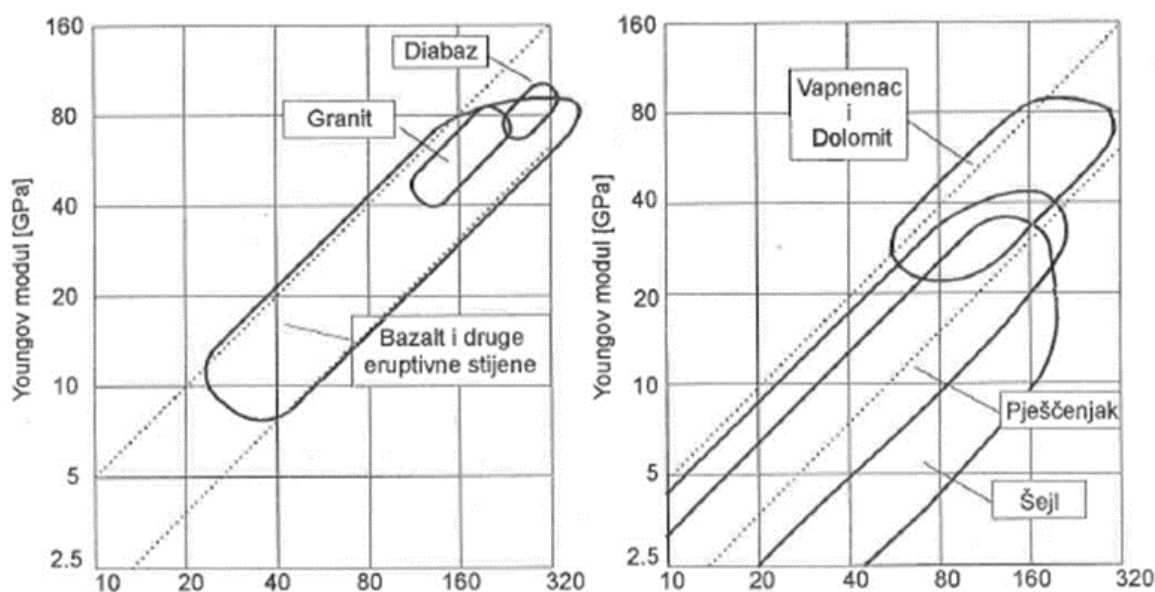
$$HF = \frac{E}{3} \quad - \text{ ako je } E < 50 \text{ GPa}$$

$$HF = \frac{\sigma}{5} \quad - \text{ ako je } E > 50 \text{ GPa}$$

E - Youngov modul elastičnosti (GPa)

σ - jednoosna tlačna čvrstoća (MPa)

Na slici 3-2. prikazana korelacija između jednoosne tlačne čvrstoće i Youngovog modula elastičnosti za različite vrste stijena.



Slika 3-2. Korelacija jednoosne tlačne čvrstoće i Youngovog modula elastičnosti za različite vrste stijena (Strelec, 2001)

Modificirana Rosin-Rammlerova jednadžba dana je izrazom 3-3 koji glasi:

$$R_x = e^{\left(-0,693\left(\frac{x}{x_{50}}\right)^n\right)} \quad (3-3)$$

gdje je:

R_x - udio materijala koji prolazi kroz sito s otvorom veličine x

x - veličina otvora na situ (cm)

x_{50} - prosječna veličina fragmenata (cm)

n - indeks jednoličnosti

Za pravilno određivanje Rosin-Rammlerove krivulje, potrebno je definirati indeks jednoličnosti (n) koji se nalazi u eksponentu jednadžbe. Indeks jednoličnosti definirao je Cunningham koristeći se terenskim podacima i analizama parametara stijenske mase. Indeks jednoličnosti ovisi o:

- točnosti bušenja,
- omjeru izbojnice i promjera minske bušotine,

- razmaknutog ili kvadratnog rasporeda bušotina,
- omjera razmaka minskih bušotina i izbojnice,
- omjera duljine eksplozivnog punjenja i visine etaže

Izraz za indeks jednoličnosti dan je obrascem 3-4:

$$n = \left(2,2 - 14 \frac{B}{d}\right) \sqrt{\left(\frac{1+\frac{S}{B}}{2}\right)} \left(1 - \frac{W}{B}\right) \left(\left|\frac{BCL-CCL}{L}\right| + 0,1\right)^{0,1} \left(\frac{L}{H}\right) \quad (3-4)$$

gdje je:

B- izbojnica (m)

d- promjer minske bušotine (mm)

S- razmak između minskih bušotina (m)

W- standardna devijacija točnosti bušenja (m)

BCL- duljina glavnog punjenja (m)

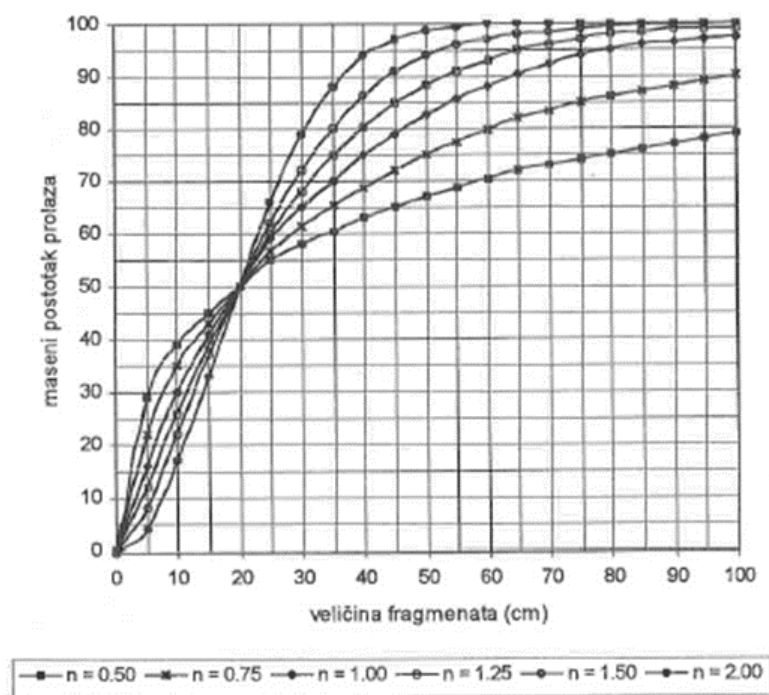
CCL- duljina pomoćnog punjenja (m)

L- duljina eksplozivnog punjenja (m)

H- visina etaže (m)

Važnost indeksa jednoličnosti može se uočiti na slici 3-3. gdje su prikazane krivulje distribucije koje imaju istu srednju vrijednost veličine fragmenata, ali različitu vrijednost indeksa jednoličnosti. Povećanjem vrijednosti indeksa jednoličnosti dobiva se ujednačenija fragmentacija odminirane stijenske mase. Za *n* manji od 0,75 dobiva se veliki udio sitneži i blokova, dok kod vrijednosti većih od 1,5 dobiva se raspodjela fragmenata koja je jednolika, ali nije isplativa. Kako bi se vrijednost indeksa jednoličnosti povećala, potrebno je (Strelec,2001):

- smanjiti omjer *B/d* (izbojnica/promjer minske bušotine),
- povećati točnost bušenja ($1-(W/B)$),
- povećati omjer *L/H* (duljina eksplozivnog punjenja/visina etaže),
- povećati omjer *S/B* (razmak minskih bušotina/izbojnica).



Slika 3-3. Utjecaj koeficijenta jednoličnosti na krivulju fragmentacije (Strelec, 2001)

Unatoč brojnim modifikacijama, u Kuz-Ram modelu još uvijek nisu obuhvaćeni svi parametri koji utječu na fragmentaciju odminirane stijenske mase. Utjecaj vremenskog usporenja na oslobađanje energije se ne uzima u obzir, uzima se samo pravilni raspored točnog iznosa energije u geometriji bušenja i miniranja. No ako su vremenska usporenja između aktiviranja neadekvatno određena, to može uzrokovati pojačane seizmičke efekte miniranja, zračni udarni val, odbacivanje materijala i količinu blokova, te se na taj način može promijeniti konačan rezultat miniranja (Cunningham, 2005).

3.2. Swebrec funkcija

Modifikacija Kuz-Ram modela, u kojoj je Rosin-Rammlerova funkcija razdiobe zamijenjena novom Swebrec funkcijom, prema istraživanjima točnije opisuje razdiobu fragmenata. Swebrec funkcija ispravlja loše predviđanje udjela sitnih frakcija, te određuje gornju granicu veličine fragmenta koja prema Rosin-Rammlerovoj krivulji seže u beskonačnost. Razdioba veličine fragmenata preko Swebrec funkcije se poklapa sa preko stotinu ispitivanja razdioba veličina fragmenata dobivenih sijanjem materijala i to sa koeficijentom korelacije $r^2 \geq 0,995$. Skoro savršeno poklapanje krivulja sa koeficijentom korelacije od 0,997 odvija se u rasponu od 0,5 mm do 500 mm. Ovakva modifikacija Kuz-

Ram modela naziva se KCO modelom (Kuznetsov-Cunningham-Ouchterlony), bazira se na zamjeni Rosin-Rammlerove funkcije logaritamskom funkcijom koja je definirana s 3 parametra, a dana je izrazom 3-5:

$$R_x = \frac{1}{\left\{1 + \left(\ln \frac{x_{max}}{x} / \ln \frac{x_{max}}{x_{50}}\right)^b\right\}} \quad (3-5)$$

gdje je:

x_{max} - maksimalna veličina fragmenta (cm)

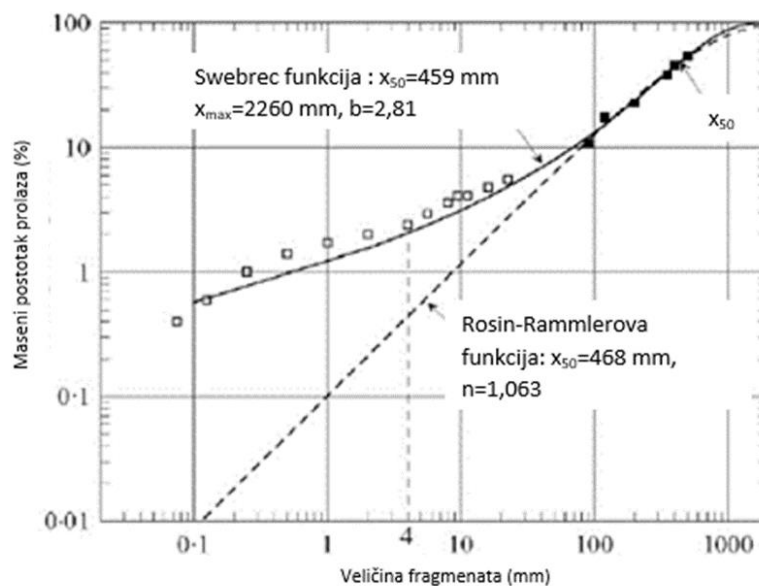
x_{50} – srednja veličina fragmenta (cm)

b - parametar oblika krivulje

Maksimalna veličina fragmenta x_{max} definirana je kao veličina manja od najveće veličine bloka u ležištu ili najvećeg razmaka minskih bušotina. Parametar b modificirani je oblik Cunninghamovog koeficijenta jednoličnosti n , a dan je izrazom 3-6:

$$b = \left(2 \ln 2 \cdot \ln \frac{x_{max}}{x_{50}}\right) \cdot n \quad (3-6)$$

Na slici 3-4. prikazana razdioba veličine fragmenata Rosin-Rammlerovom i Swebrec funkcijom u odnosu na rezultate dobivene sijanjem. Na slici je vidljiva greška Rosin-Rammlerove krivulje u području sitnijih frakcija, ali isto tako možemo vidjeti poklapanje u gornjem dijelu krivulja (Ouchterlony, 2006).

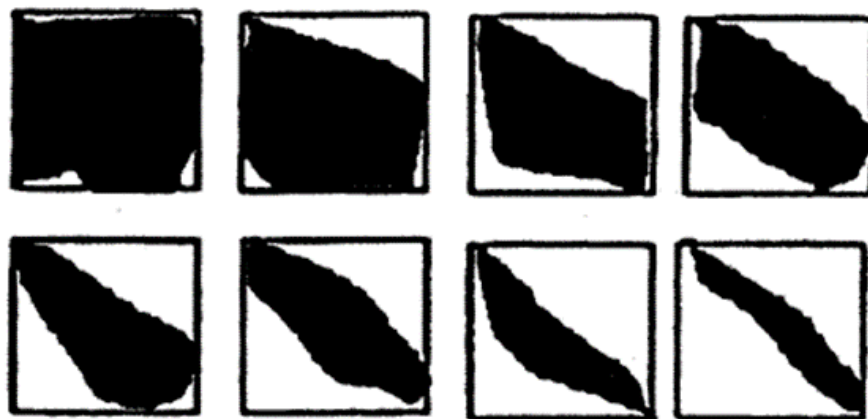


Slika 3-4. Prikaz usporedbe razdiobe fragmenata Rosin-Rammlerovom i Swebrec funkcijom (Ouchterlony, 2006)

4. METODE ZA ANALIZU FRAGMENTACIJE ODMINIRANE STIJENSKE MASE

Metode za analizu fragmentacije odminirane stijenske mase omogućuju inženjerima brzo i kvalitetno pronalaženje optimalnih rješenja miniranja koja za cilj imaju dobivanje povoljne fragmentacije stijenske mase. Analize fragmentacije odminirane stijenske mase moraju biti pouzdane i točne, kako bi se na temelju njih poduzimale promjene u radu postrojenja koje bi povećale učinkovitost radnih procesa. Metode analize koje se najčešće koriste su pokusno sijanje, fotografsko određivanje razdiobe, te metode opažanja. Kod metoda opažanja, inženjer na terenu ocjenjuje fragmentaciju i ostale rezultate miniranja. Metoda je subjektivna jer ovisi o iskustvu i stručnosti inženjera, te ne daje informacije o granulometrijskom sastavu odminiranog materijala. Analiza fragmentacije pomoću softvera omogućila je bržu, jednostavniju i jeftiniju mogućnost kvantitativne analize rezultata miniranja. Dobivanjem stvarnih mjerenja razdiobe fragmenata postiže se bolje razumijevanje strukturne građe stijenske mase, te se na taj način, ako u obzir uzmemo vrstu eksploziva kojim miniramo i geometriju bušenja, može ostvariti bolje prognoziranje fragmentacije stijenske mase.

Sijanje čitave odminirane mase je najtočnija metoda određivanja granulometrijskog sastava, no zbog visokih troškova nije isplativa. Alternativa sijanju čitave odminirane mase je pokusno sijanje. Pokusno sijanje je najraširenija metoda za analizu veličine fragmenata kojom je pokriven širok raspon veličina fragmenata (10-100 000 μm). Odabirom reprezentativnih uzoraka koji moraju predstavljati cijelu odminiranu masu i njihovim sijanjem moguće je odrediti granulometrijski sastav materijala. Metoda se izvodi sijanjem poznate mase uzorka materijala kroz sve manje otvore sita, te vaganjem materijala koji ostaje na situ. Sita imaju ulogu zadržavanja fragmenata većih od otvora na rešetci, te se na taj način klasiraju fragmenti koji ostaju na situ od onih koji kroz njega prolaze. Fragmenti odminirane stijenske mase su većinom nepravilnog oblika, najčešće trapezoidalnog. Ako se dimenzije fragmenta definiraju sa a (najdulja dimenzija), b (širina fragmenta) i c (najkraća dimenzija), pri sijanju nekog fragmenta uz dovoljno vibriranje, njegov prolazak kroz otvor sita ovisit će o širini fragmenta b i obliku fragmenta (slika 4.1.)



Slika 4-1. Različiti oblici fragmenata koji prolaze kroz otvor sita

Eksperimentalno i teorijski je dokazano da će fragment eliptičnog presjeka sa poluosima b i c proći kroz pravokutni otvor sita $D_1 \times D_2$ ako ispunjava uvjet :

$$(2b)^2 + (2c)^2 \leq D_1^2 + D_2^2 \quad (4-1)$$

Za kvadratni otvor D vrijedi uvjet:

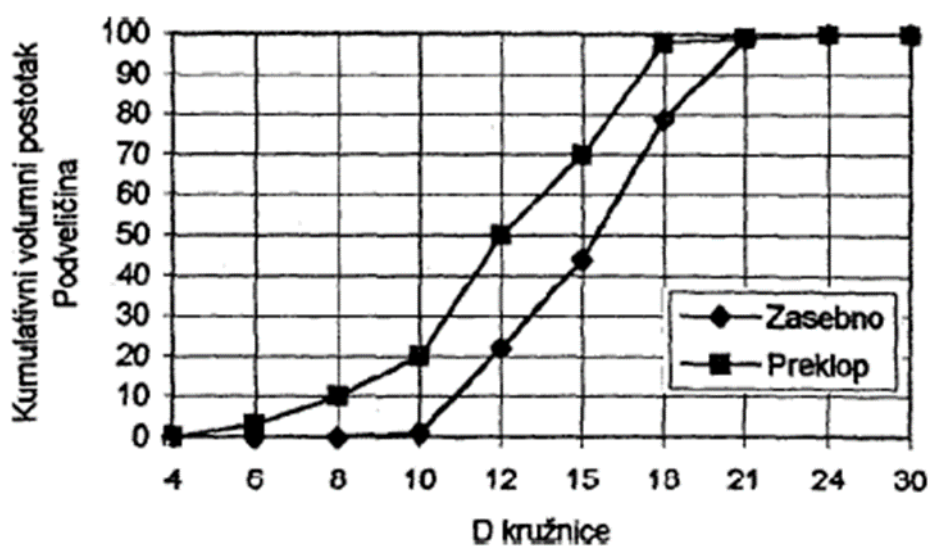
$$\sqrt{(2b)^2 + (2c)^2} \leq D \quad (4-2)$$

iz čega možemo zaključiti da će veličina otvora sita definirati veličinu fragmenta na temelju dviju manjih dimenzija, b i c (Strelec et al., 2002b).

Metode analize fotografija možemo podijeliti na jednodimenzionalne (1D), dvodimenzionalne (2D) i trodimenzionalne (3D). Zbog složenosti sustava 3D metoda i nedovoljne točnosti 1D metode, najveću primjenu u praksi pronasla je 2D metoda analize fotografija. Metoda se koristi u laboratorijima, za analizu agregata na transportnim trakama, analizu fragmentacije odminirane mase i dr. Analizom fotografija nastoji se dobiti razdioba veličine fragmenata čiji se rezultati poklapaju sa rezultatima razdiobe u analizi sijanjem. Pretpostavlja se da će fragment zauzeti takav položaj na ravnini da su najdulja dimenzija a i širina b paralelne s ravninom, dok je najkraća dimenzija c vertikalna u odnosu na ravninu. U takvom položaju fotografije nije moguće izmjeriti dimenziju c , te se može procijeniti samo veličina površine fragmenta određena sa dimenzijama a i b . Fotografsko određivanje razdiobe se koristi kao alternativa za metodu sijanja odminirane mase. Razlog tome je što određivanje fragmentacije ovom metodom ne prekida proizvodnju, nije skupo, a rezultati su pravovremeno osigurani, te daju dobar ukupni prikaz fragmentacije. Nedostatak ove metode je točnost koja ovisi o sljedećim greškama (Strelec et al., 2002a):

- fotografije ne pokazuju treću dimenziju,
- fotografije kao uzorke uzimaju samo one fragmente stijene koje se nalaze na površini odminirane mase,
- fotografije mogu biti izobličene,
- rezolucija fotografije je ograničena, tj. oni fragmenti stijene manji od minimalne vrijednosti rezolucije neće biti primijećeni,
- softver za analizu može pogrešno interpretirati fotografiju, npr. u slučaju kad je tekstura na površini fragmenta vrlo izražena,
- na fotografiji dolazi do međusobnog prekrivanja fragmenata i odsijecanja dijela fragmenata na rubovima fotografija.

Usporedbom rezultata dobivenih sijanjem i rezultata fotografskim postupkom u situaciji međusobnog prekrivanja fragmenata uočava se tendencija umanjivanja rezultata kod analize fotografijom, prikazana na slici 4-2.



Slika 4-2. Različite veličine istog materijala između međusobno prekrivenih i odvojenih fragmenata

Iako za ovu tendenciju umanjivanja jedan od glavnih razloga može biti međusobno prekrivanje fragmenata, treba uzeti u obzir i ostale faktore koje uzrokuju ovaj problem, a to su (Božić i Strelec, 2001):

- pogreška sustava za snimanje fotografije,
- kvaliteta materijala agregata i,
- radna sposobnost softvera.

Pogreške sustava za snimanje fotografije su loši uvjeti osvjetljenja, položaj fotografskog aparata i njegova kvaliteta. U lošim uvjetima osvjetljenja može doći do neprepoznavanja rubova pojedinih fragmenata. Pravilan položaj fotografskog aparata osigurava konstantnu rezoluciju slike po određenom području. Kvaliteta fotografskog aparata odnosi se na njegovu zaštitu od kiše, prašine i temperature. Kvaliteta materijala agregata opisana je stupnjem preklapanja, trodimenzionalnim geometrijskim svojstvima fragmenata i varijacijom boje površine fragmenta. Softver mora koristiti ispravne postupke za računanje veličine fragmenata, te primijeniti odgovarajuće korekcije za ispravljanje pogrešaka kako bi se rezultati što bolje poklapali sa stvarnom fragmentacijom. Ukupna pogreška koja je uzrok problema tendencije umanjivanja dana je izrazom 4-1:

$$P = P_{kamera} + P_{materijal} + P_{program} + P_{drugo} \quad (4-3)$$

Pogrešku materijala možemo opisati izrazom 4-2:

$$P_{materijal} = P_r + P_e + P_o + P_d + P_c + P_w + P_f + P_b \quad (4-4)$$

gdje je:

r – hrapavost i geometrija površine fragmenta

e- fragmenti na rubovima okvira fotografije

o- stupanj prekrivanja

d- razdioba veličine ili varijacija područja

c- varijacija boje između fragmenata

w- mokri materijal koji također ima utjecaj na rezultate

f- količina sitnog materijala

b- boja pozadine u usporedbi s bojom fragmenta

Osnovna pogreška materijala je u tome što se fragmenti čine manjima nego što zapravo jesu. Pogreške fotografskog uređaja i tehnike snimanja uzoraka, kao i sve ostale moguće pogreške potrebno je reducirati na najmanju moguću mjeru, kako bi analiza fotografijom što bolje predstavljala stvarnu fragmentaciju stijenske mase (Božić i Strelec, 2001).

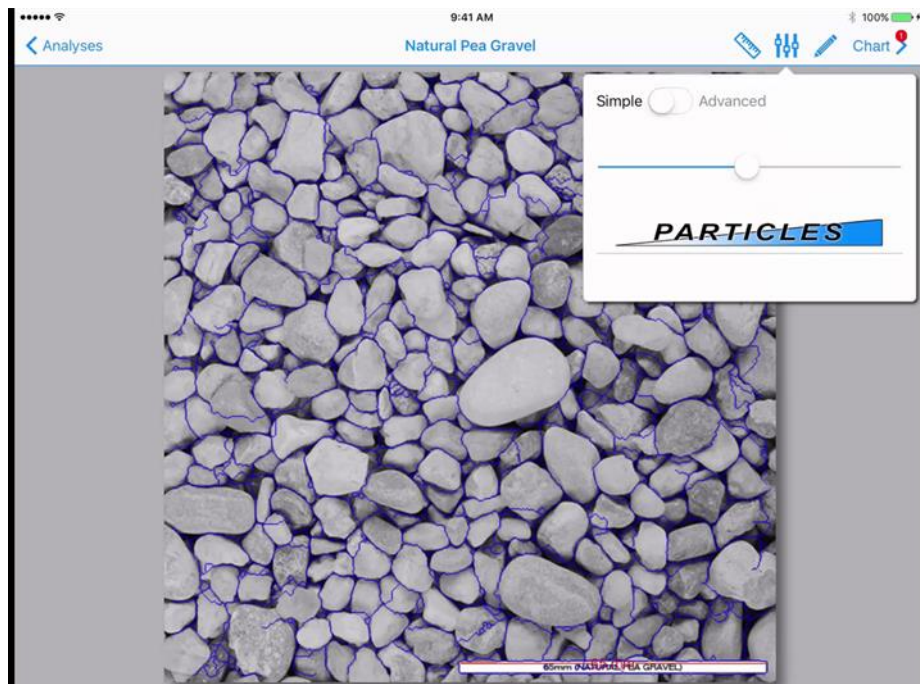
Proces obrade fotografije obuhvaća skaliranje fotografije radi utvrđivanja stvarnog mjerila, određivanje rubova fragmenata, te zbrajanje dobivenih veličina fragmenata. Zatim

se provodi klasiranje veličina fragmenata u intervale koji su određeni veličinom otvora sita kroz koje bi fragmenti prošli. Kao rezultat dobije se grafički prikaz razdiobe veličina fragmenata.

Fotografsko određivanje razdiobe fragmenata sve se više koristi u praksi, obzirom da je određivanje razdiobe fragmenata metodom sijanja dugotrajan, skup i zahtjevan postupak. Prednost fotografskog određivanja razdiobe je i to što se njezini podaci mogu koristiti za bolje prognoziranje pomoću Kuz-Ram modela. Uspoređivanjem rezultata dobivenih fotografskim određivanjem razdiobe fragmenata sa prognoziranim rezultatima mogu poslužiti za kalibraciju parametara Kuz-Ram metode. Razlike u rezultatima dobivenim fotografskim postupkom i prognoziranim rezultatima mogu upućivati na nedovoljan stupanj poznavanja strukturne građe stijenske mase, što se može ispraviti prilagodbom faktora stijene iz Kuz-Ram modela. Faktor stijene i ostale parametre u projektu miniranja treba prilagoditi na način da se krivulje stvarne i prognozirane razdiobe što bolje podudaraju, kako bi se pri budućim miniranjima ostvarila što bolja razdioba fragmentacije stijene. U slučaju da se podešavanja parametara faktora stijene ne čine opravdanim u odnosu na dobivene rezultate značajki stijenske mase, moguće je da rezultati dobiveni fotografskom analizom nisu točni. Kako bi se dobili što točniji rezultati, potrebno je provesti veći broj analiza istog područja. Neki od poznatijih softvera za analizu fragmentacije pomoću fotografije su: GoldSize, SplitEngineering, FragScan, WipFrag i Fragalyst (Strelec, 2001).

4.1. WipFrag

Program WipFrag analizira digitalne fotografije odminirane stijenske mase radi utvrđivanja veličine i razdiobe fragmenata odminirane stijenske mase. Poželjno je analizirati više slika istog područja kako bi statistički povećala pouzdanost analize. Za razliku od nekih sličnih programa za analizu fragmentacije pomoću digitalne fotografije, u WipFragu je omogućeno automatsko generiranje mreže fragmenata (slika 4-3.), što uvelike ubrzava postupak analize.



Slika 4-3. Automatsko generiranje mreže u softveru WipFrag

Prije fotografiranja odminirane mase potrebno je poduzeti određene mjere predstrožnosti (Venkatesh, 2010):

- odabrati prikladna mjesta za fotografiranje stijenske mase gdje se mogu obuhvatiti najreprezentativniji uzorci stijene u svrhu dobivanja pouzdanih rezultata analize fragmentacije,
- na mjesto fotografiranja potrebno je postaviti minimalno jedan predmet za skaliranje poznate duljine, npr. šipku od 2 metra. Poželjno je predmet postaviti blizu ruba odminirane mase, kako ne bi utjecao na rezultate analize,
- slike odminirane mase treba uzimati pouzdanim uređajem za fotografiranje, a poželjno je da uzmemo najmanje pet snimaka na različitim lokacijama odminirane stijenske mase.

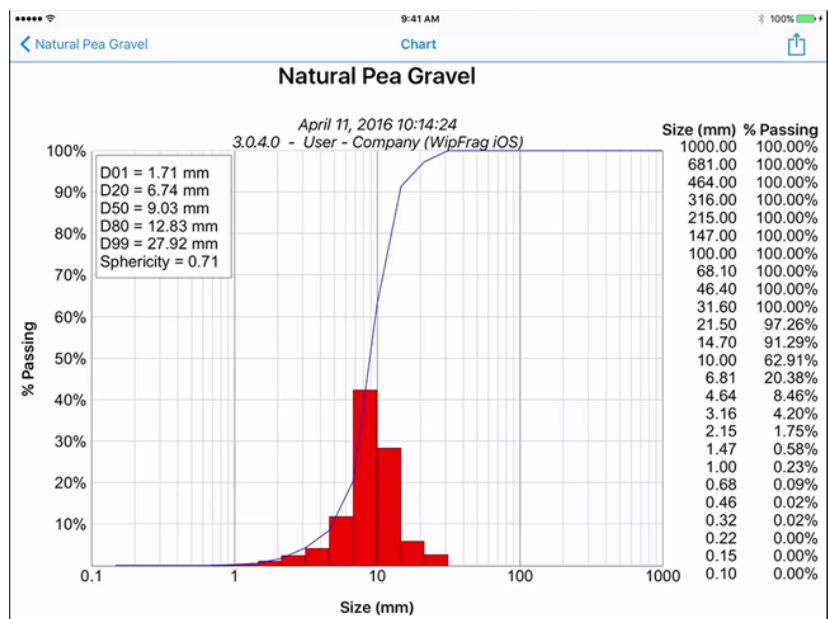
Prilikom fotografiranja odminirane stijenske mase potrebno je (Venkatesh, 2010):

- izbjegavati uzimanje fotografija izbliza i iz kosih kuteva kako ne bi došlo do izobličenja fotografija,
- osigurati ravnomjerno osvjetljenje odminirane mase bez prekomjernih oštih i jednostranih sjena jer detekcija rubova fragmenata ovisi o jačini svjetlosti,

- pažljivo odabrati lokacije fotografije zbog tendencije da manji fragmenti padaju između većih i ostaju skriveni ispod njih, što uzrokuje dojam krupnije fragmentacije stijenske mase.

Nakon uzimanja fotografija pristupa se procesu analize koji se sastoji od sljedećih koraka:

- prenošenja fotografija odminirane mase u WipFrag sustav. Slike se spremaju na računalo u jpeg ili bmp obliku,
- nakon otvaranja fotografije izvršava se korekcija nagiba. Poželjno je da prilikom uzimanja fotografija objektiv bude horizontalno postavljen u odnosu na odminiranu masu. U tom slučaju dovoljan je jedan predmet za skaliranje. U slučaju da kut slikanja nije horizontalan, potrebno je postaviti dva predmeta za skaliranje, jedan u gornjem, a drugi u donjem dijelu fotografije kako bi se pouzdano utvrdio faktor skaliranja i postigla korekcija nagiba, te izbjegla pogrešna interpretacija veličine fragmenata na fotografiji.
- sljedeći korak je generiranje mreže. Naredbom „*Generate net*“ automatski se generira mreža linija koja određuje rubove fragmenata i uklanja utjecaj granica rubova fotografije. Proces traje svega nekoliko sekundi i moguće je odabrati gustoću generirane mreže. Postoje dva tipa pogreški koje se javljaju prilikom automatskog generiranja mreže, a to su dezintegracija i fuzija fragmenata. Fuzija prikazuje više fragmenata materijala kao jedan, dok dezintegracija prikazuje jedan fragment kao više komada materijala. Pogreške fuzije i dezintegracije potrebno je ispraviti pomoću alata koji omogućuju iscrtavanje i brisanje linija automatski generirane mreže.
- nakon postavljanja generirane mreže pristupa se proračunu čiji je rezultat grafički prikaz raspodjele veličine fragmenata (slika 4-4.).



Slika 4-4. Prikaz raspodjele veličine fragmenata

5. PRIMJER UTVRĐIVANJA FRAGMENTACIJE ODMINIRANE STIJENSKE MASE

Probno miniranje je izvedeno u eksploatacijskom polju „Sv. Juraj – Sv. Kajo“ u kojem prevladavaju kalkareniti, vrsta klastičnih vapnenaca koja je izgrađena od čestica veličine pijeska ili šljunka nastalih od starijih vapnenaca. Probno miniranje u kamenolomu „Sv. Juraj-Sv. Kajo“ sastojalo se od pet potpolja s različitim parametrima miniranja. Potpolja su otpucana svaka zasebno. S obzirom na neregularnost punjenja kod petog potpolja, za to potpolje nije provedena analiza fragmentacije odminirane stijenske mase.

5.1. Značajke stijenske mase

Na temelju inženjersko-geoloških istraživanja u eksploatacijskom polju utvrđeni su krupnozrnati do srednje zrnati biokalkareniti, koji se sastoje od deritrusa organogenog porijekla uz rijetke pojave zrnaca kvarca i glaukonita, te ulomaka foraminifera i koralja. Utvrđeno je pružanje kalkarenita bez prekida kroz središnji dio ležišta od istoka prema zapadu, sa nagibom slojeva prema sjeveru i sjeveroistoku. Kalkareniti se pojavljuju i u južnom dijelu kamenoloma gdje su utvrđene bore dekametarskih dimenzija. Utvrđeni slojevi u južnom dijelu nagnuti su prema jugoistoku. Vrijednost RQD-a dobivena iz bušotina iznosi od 79 % do 87 %, dok vrijednost RQD-a dobivenog na temelju srednjih razmaka diskontinuiteta osnovnog strukturnog sklopa iznosi 100 %, što nam ukazuje na visoku intaktnu čvrstoću kalkarenita. Na temelju bušotina se također može zaključiti kako je dubina zone trošenja u kalkarenitima neznatna. U tablici 5-1. navedene su značajke intaktnog materijala.

Tablica 5-1. Značajke intaktnog materijala

Značajke intaktnog materijala	Vrijednost	Jedinica
Gustoća	2679,0	kg/m ³
Jednoosna tlačna čvrstoća	235,221	MPa
Youngov modul deformabilnosti	46158,0	MPa

U stijenskoj masi su utvrđene tri familije diskontinuiteta i dvije pojedinačne pukotine. U tablici 5-2. navedene su ostale strukturne značajke stijenske mase.

Tablica 5-2. Strukturne značajke stijenske mase

Strukturne značajke stijenske mase	Vrijednost	Jedinica
Broj pukotina po kubičnom metru	4,0	1/m ³
Faktor oblika bloka	36,0	-
Prosječna veličina bloka	0,563	m ³
Karakteristična veličina bloka	1,41	m
Koeficijent jednoličnosti stijenske mase	2,704	-

U tablici 5-3. navedene su značajke stijenske mase. Podaci navedeni u tablicama koriste se kao ulazni parametri prilikom prognoziranja fragmentacije stijene.

Tablica 5-3. Značajke stijenske mase

Značajke stijenske mase	Vrijednost	Jedinica
RQD	83,0	%
GSI	55,0	-
Jednoosna tlačna čvrstoća	6,425	MPa
Modul deformabilnosti	4905,0	MPa
Kohezija	1,25	MPa
Kut unutarnjeg trenja	44,7	°

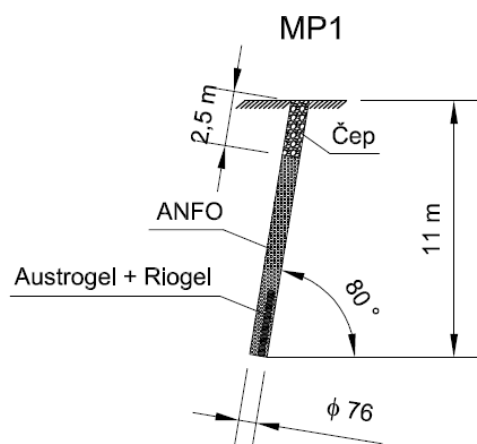
5.2. Parametri minskog polja

Probna miniranja provedena na površinskom kopu „Sv. Juraj- Sv. Kajo“ sastojala su se od pet potpolja s različitim parametrima miniranja, prikazanih u tablici 5-4. Miniranja su provedena na lokaciji Matanuše „140/130“. Izvedena su na etažama visine 11 m do 12 m, približnog pružanja istok-zapad s nagibom od 80° u kalkarenitnoj stijenskoj masi. Probušenje je kod svih bušotina iznosilo 1,0 m, a duljina čepa iznosila je 2,5 m.

Tablica 5-4. Minersko-tehničke značajke probnih minskih polja

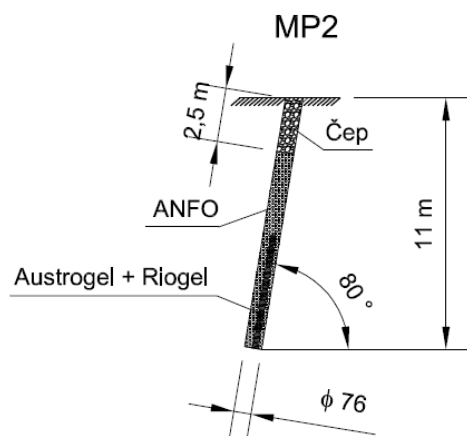
Minsko polje	232/1	232/2	232/3	232/4	232/5
Broj bušotina	3	3	3	4	2
Promjer bušotine (mm)	76	76	83	83	83
Nagib etaže (°)	80	80	80	80	80
Visina etaže (m)	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5
Probušenje (m)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Duljina bušotina (m)	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7
Izbojnica (m)	2,5	3,0	3,3	3,0	3,0
Razmak bušotina (m)	3,0	3,5	4,0	3,5	3,5
Duljina čepa (m)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Način punjenja	Cjelovito	Cjelovito	Razdjelno	Razdjelno	Cjelovito
Najveća masa po bušotini/ stupnju otpucavanja (kg)	35,0	36,5	21,5	23,0	26,0

Prvo potpolje se sastojalo od tri minske bušotine promjera 76 mm, s razmakom između bušotina od 3,0 m i izbojnicom od 2,5 m (slika 5-1.).



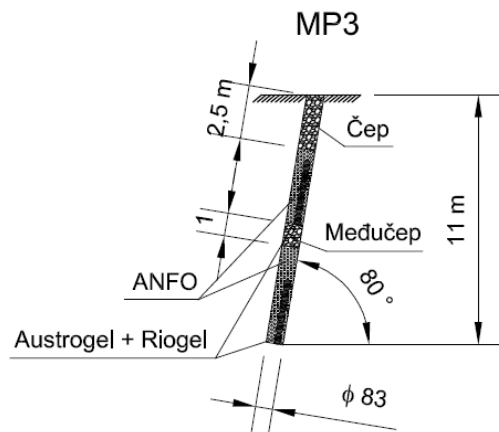
Slika 5-1. Konstrukcija eksplozivnog punjenja minskih bušotina potpolja 232/1

Drugo potpolje činile su također tri minske bušotine promjera 76 mm, ali s razmakom od 3,5 m i izbojnicom od 3,0 m. (slika 5-2.).



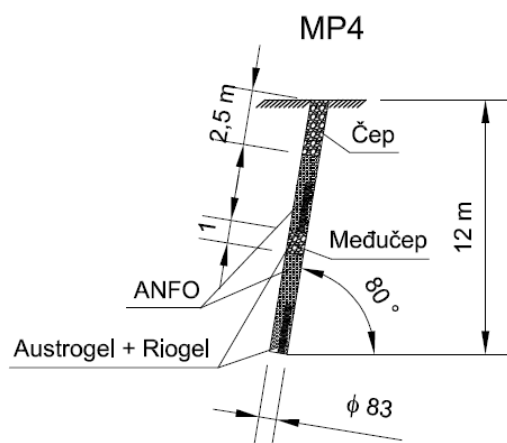
Slika 5-2. Konstrukcija eksplozivnog punjenja minskih bušotina potpolja 232/2

Treće potpolje sastojalo se od tri minske bušotine promjera 83 mm, izbojnice od 3,3 m i razmaka između bušotina od 4,0 m. Punjenja su bila razdvojena međučepom, odnosno, s dva stupnja paljenja po bušotini (slika 5-3.).



Slika 5-3. Konstrukcija eksplozivnog punjenja minskih bušotina potpolja 232/3

Četvrto potpolje sastojalo se od četiri minske bušotine, promjera 83 mm, sa izbojnicom od 3,0 m i razmakom od 3,5 m. Također su bila izvedena s 2 stupnja paljenja. (slika 5-4.).



Slika 5-4. Konstrukcija eksplozivnog punjenja minskih bušotina potpolja 232/4

Peto potpolje činile su dvije bušotine promjera 83 mm, razmaka od 3,5 m i s izbojnicom od 3,0 m. S obzirom na neregularno punjenje, peto polje nije uzeto u daljnju analizu fragmentacije odminirane stijenske mase.

5.3. Usporedba prognozirane fragmentacije sa fotografskom analizom fragmentacije odminirane stijenske mase računalnim programom „Wip-Frag“

Za prognozu fragmentacije stijenske mase korišteni su Kuz-Ram i KCO model. Stvarna razdioba fragmenata materijala dobivena aplikacijom „WipFrag“ provedena je na odabrana četiri potpolja i uspoređena je s navedenim modelima za prognozu fragmentacije stijenske mase. Kuz-Ram model koristi Rosin-Rammlerovu funkciju za prikaz razdiobe fragmenata stijena. Ulazni parametri za Kuz-Ram model su:

- intaktna svojstva stijena,
- pukotinski sustav,
- karakteristike korištenog eksploziva,
- parametri minskog polja i
- tražena fragmentacija.

Na temelju tih podataka dobivaju se sljedeći izlazni parametri:

- osnovni podaci odminirane stijenske mase,
- predviđena fragmentacija u odnosu na traženu fragmentaciju,
- predviđena granulometrijska krivulja.

KCO model koristi Swebrec funkciju za prikaz razdiobe fragmenata materijala.

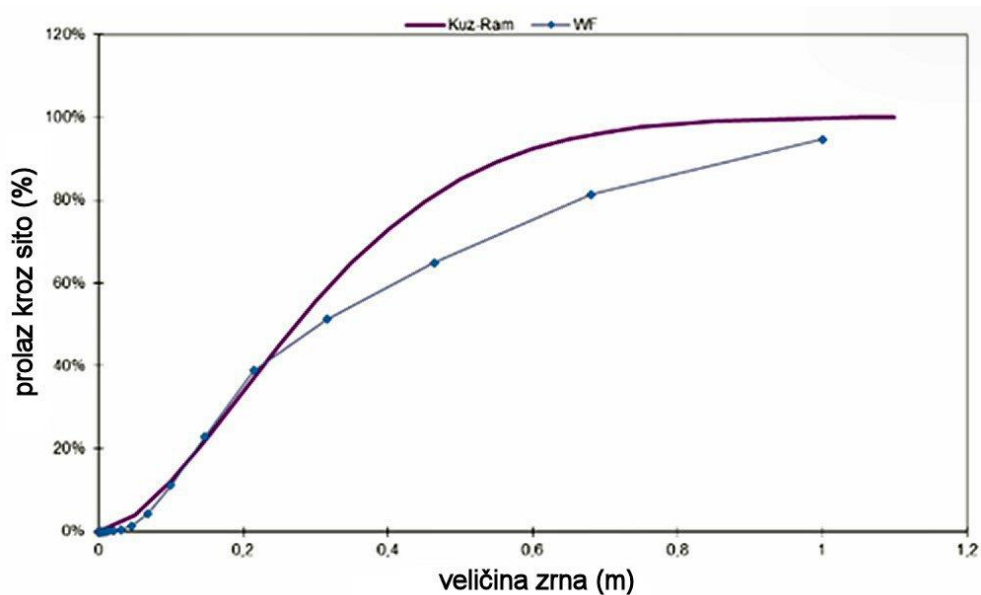
Ulazni parametri modela su:

- parametri minskog polja,
- faktor stijenske mase,
- parametri eksploziva.

Na temelju tih podataka dobivaju se sljedeći izlazni parametri:

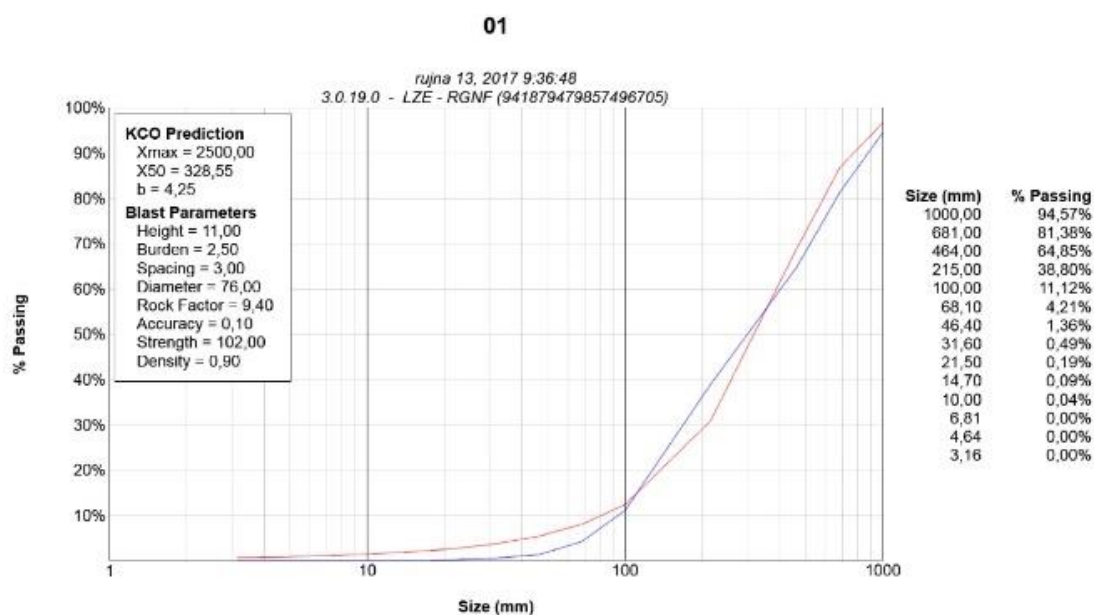
- predviđene vrijednosti granulacije,
- predviđena granulometrijska krivulja.

Na slikama 5-5. i 5-6. prikazana je usporedba granulometrijskih krivulja u potpolju 232/1. Granulometrijska krivulja dobivena fotografskom analizom pokazuje manji udio krupnijih komada odminirane stijenske mase za fragmentaciju iznad 30 cm, dok se krivulje relativno dobro poklapaju za fragmentaciju ispod 30 cm (slika 5-5.).



Slika 5-5. Usporedba granulometrijskih krivulja dobivenih prognozom Kuz-Ram modela i fotografskom analizom softvera „WipFrag“ za potpolje 232/1

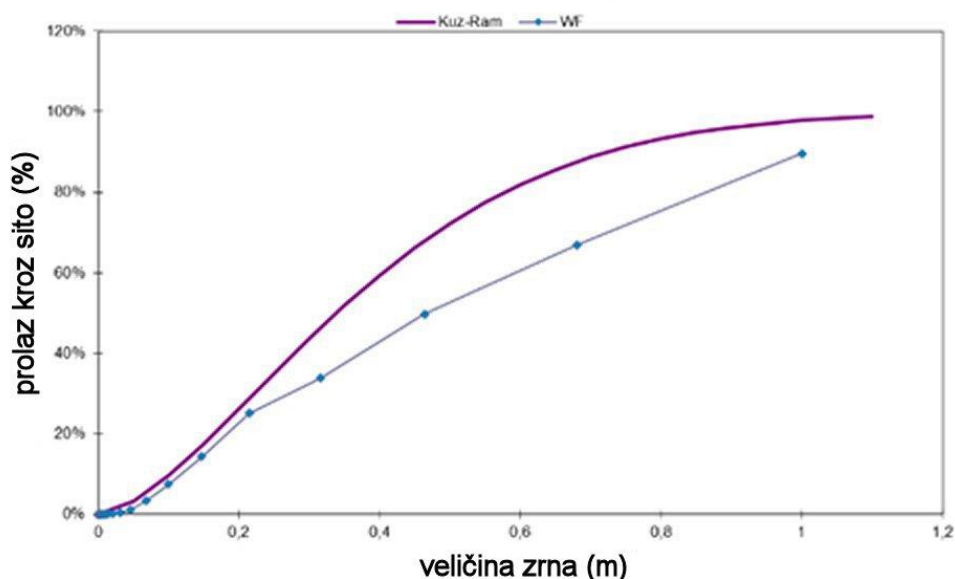
Na slici 5-6. uočavamo relativno dobro poklapanje krivulja KCO modela i fotografske analize uz male varijacije.



Slika 5-6. Usporedba granulometrijskih krivulja dobivenih prognozom KCO modela i fotografskom analizom softvera „WipFrag“ za potpolje 232/1

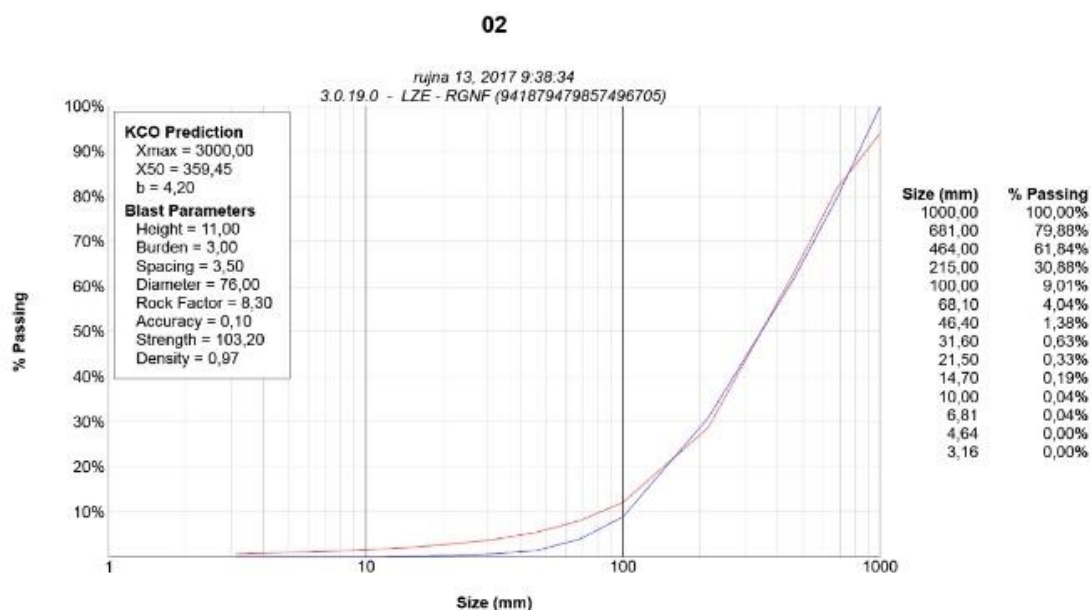
Analizom granulometrijskih krivulja za potpolje 232/2 rezultati Kuz-Ram modela i fotografske analize također se dobro poklapaju u području sitnih frakcija, dok kod

fragmentacije iznad 20 cm, krivulja prognozirana Kuz-Ram modelom pokazuje veći udio krupnijih fragmenata odminirane stijenske mase (slika 5-7.).



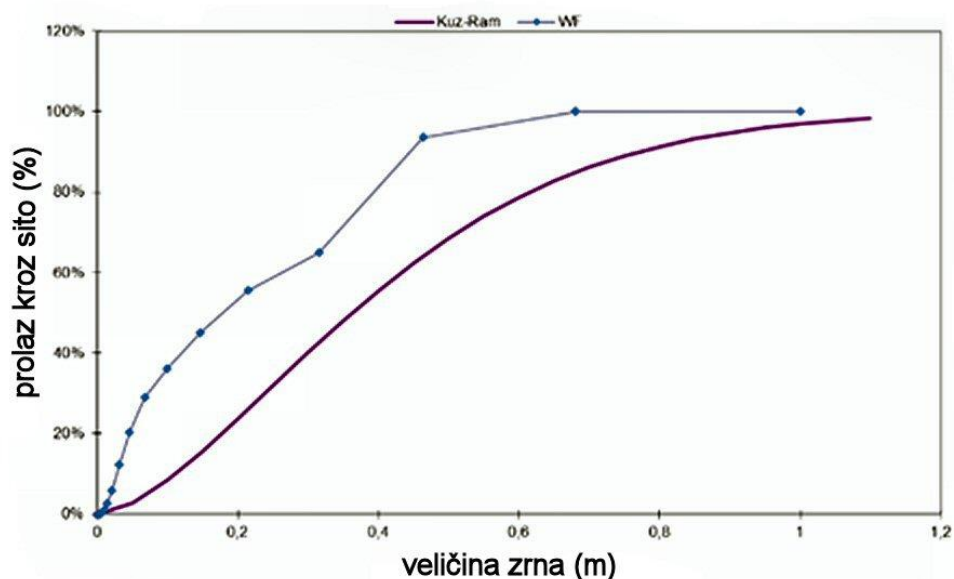
Slika 5-7. Usporedba granulometrijskih krivulja dobivenih prognozom Kuz-Ram modela i fotografskom analizom softvera „WipFrag“ za potpolje 232/2

Prognozirana krivulja KCO modela relativno se dobro poklapa sa krivuljom dobivenom fotografskom analizom uz male varijacije uz području sitnih frakcija manjih od 10 cm (slika 5-8.).



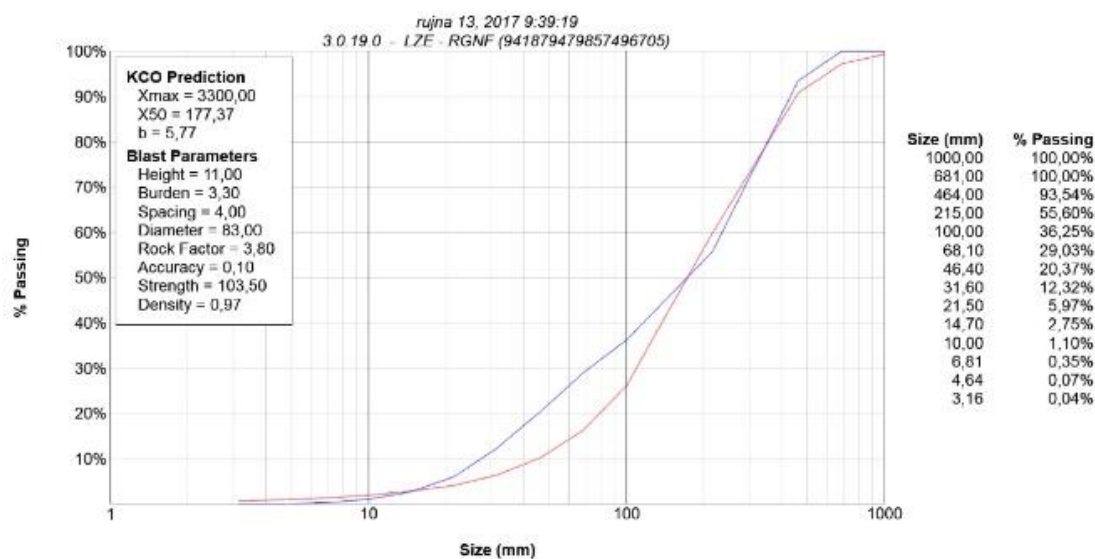
Slika 5-8. Usporedba granulometrijskih krivulja dobivenih prognozom KCO modela i fotografskom analizom softvera „WipFrag“ za potpolje 232/2

U potpolju 232/3 krivulja Kuz-Ram modela pokazuje manji udio svih veličina fragmenata odminirane stijenske mase u odnosu na krivulju dobivenu analizom fotografije (slika 5-9.).



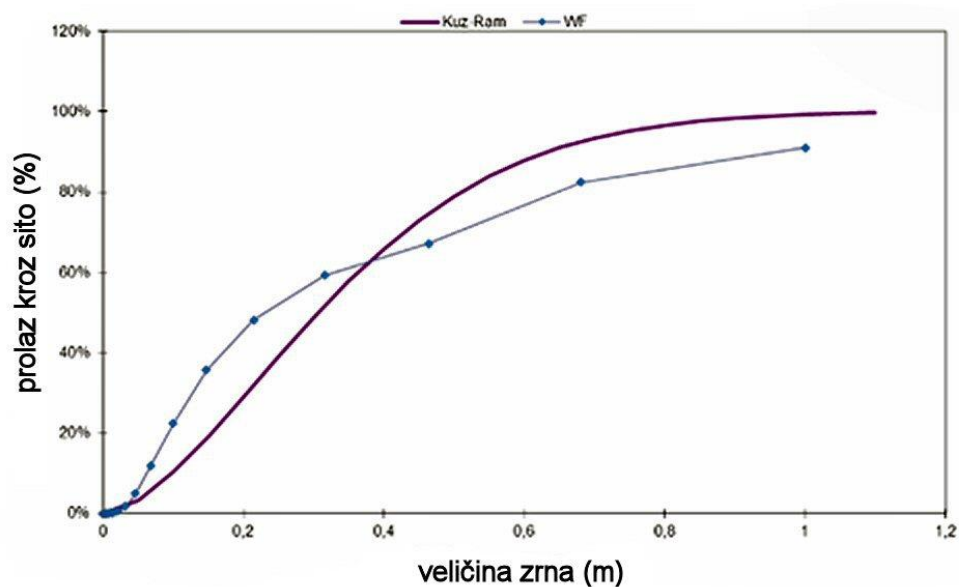
Slika 5-9. Usporedba granulometrijskih krivulja dobivenih prognozom Kuz-Ram modela i fotografjskom analizom softvera „WipFrag“ za potpolje 232/3

Krivulja dobivena aplikacijom „WipFrag“ pokazuje poklapanje sa krivuljom prognozirane fragmentacije KCO modelom, osim u intervalu od 1,5 cm do 18 cm gdje krivulja dobivena aplikacijom „WipFrag“ pokazuje veći udio fragmenata odminirane stijenske mase (slika 5-10.).



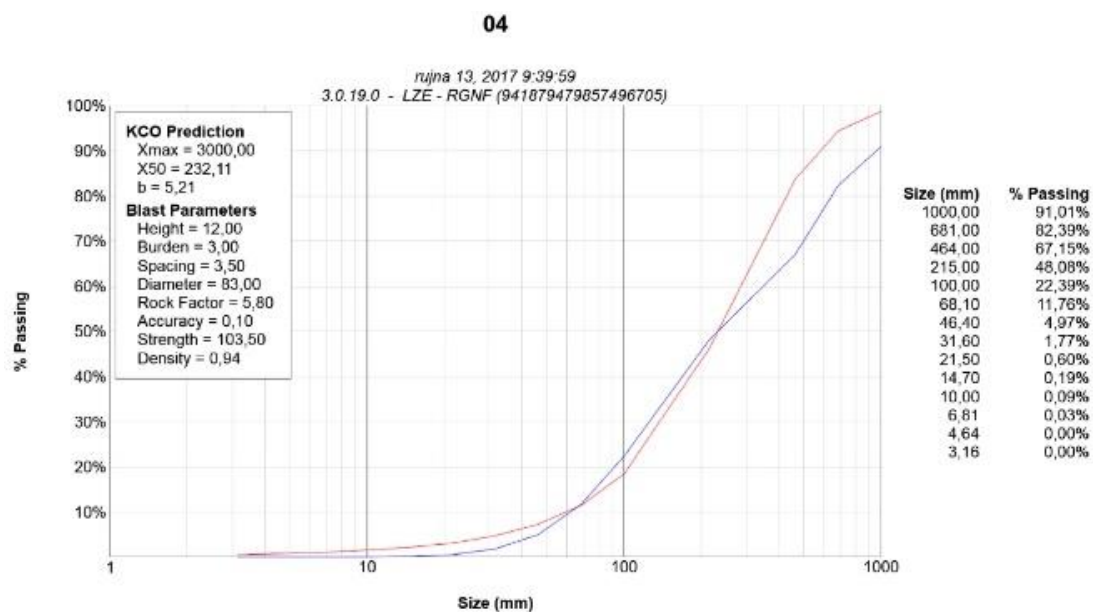
Slika 5-10. Usporedba granulometrijskih krivulja dobivenih prognozom KCO modela i fotografskom analizom softvera „WipFrag“ za potpolje 232/3

U potpolju 232/4, krivulja dobivena aplikacijom „WipFrag“ u usporedbi sa krivuljom Kuz-Ram modela pokazuje veći udio sitnih čestica za fragmentaciju od 3 cm do 38 cm, te manji udio krupnijih čestica za fragmentaciju iznad 38 cm (slika 5-11.).



Slika 5-11. Usporedba granulometrijskih krivulja dobivenih prognozom Kuz-Ram modela i fotografskom analizom softvera „WipFrag“ za potpolje 232/4

Krivulja KCO modela pokazuje relativno dobro poklapanje sa krivuljom dobivenom aplikacijom „WipFrag“ za fragmentaciju do 24 cm, dok za fragmentaciju iznad 38 cm pokazuje veći udio krupnijih komada odminirane stijenske mase (slika 5-12.).



Slika 5-12. Usporedba granulometrijskih krivulja dobivenih prognozom KCO modela i fotografskom analizom softvera „WipFrag“ za potpolje 232/4

6. ZAKLJUČAK

Fragmentacija odminirane stijenske mase je bitan parametar koji utječe na konačne troškove obrade materijala. Primarnim miniranjem stijene nastoji se dobiti povoljna granulacija materijala koja umanjuje troškove u svim sljedećim fazama obrade mineralne sirovine. Parametre miniranja potrebno je optimizirati kako bi se dobila ujednačenija fragmentacija materijala, pri čemu treba obratiti pozornost na činjenicu da povećavanje stupnja fragmentacije vrijedi do određene granice nakon koje se troškovi obrade mineralne sirovine povećavaju.

Jednostavnost i usklađenost Kuz-Ram modela sa parametrima miniranja koji utječu na fragmentaciju stijena razlog su zašto je ovaj model jedan od najkorištenijih u inženjerskoj praksi. Zamjenom Rosin-Rammlerove funkcije Swebrec funkcijom postiže se točnije predviđanje sitnih fragmenata i bolje poklapanje sa stvarnom razdiobom fragmenata, te će se takva modifikacija Kuz-Ram modela, nazvana KCO model, u budućnosti sve češće koristiti. Glavni nedostatak Kuz-Ram modela su nedovoljno poznate karakteristike stijene, zbog kojih nije moguće utvrditi stvarno ponašanje stijenske mase. Stoga se koriste rezultati dobiveni analizom fragmentacije odminirane stijenske mase, koji u usporedbi sa prognoziranim rezultatima mogu poslužiti za kalibraciju faktora stijene (A) iz Kuz-Ram modela.

Za analizu fragmentacije odminirane mase u praksi se najčešće koriste pokusno sijanje i analiza fragmenata fotografijom. Obje metode su se pokazale kao pouzdane i primjenive u praksi, te je njima moguće dobiti rezultate koji približno odgovaraju stvarnoj razdiobi fragmenata odminirane stijenske mase. Kako je određivanje fragmentacije sijanjem dugotrajan, skup i zahtjevan postupak, u inženjerskoj praksi sve se više koristi analiza fragmentacije fotografijom. Analiza fragmentacije fotografijom je jeftina, ne prekida proizvodnju i daje dobar ukupni prikaz fragmentacije ukoliko se koriste pravilne tehnike snimanja i izbjegavaju pogreške koje nastaju zbog loših uvjeta osvjetljenja, položaja fotografskog aparata u odnosu na odminiranu stijensku masu, te same kvalitete uređaja za snimanje fotografija.

Analizom granulometrijskih krivulja za sva potpolja ustanovljeno je da krivulje KCO modela daju nešto bolja prognožiranja fragmentacije od Kuz-Ram modela. Kuz-Ram model je dao dosta dobra preklapanja s krivuljom dobivenom WipFragom kod potpolja

232/1 i 232/2 za prognoziranja fragmentacije kod veličina zrna ispod 30 cm. Može se pretpostaviti da je uzrok lošeg prognoziranja Kuz-Ram modela u potpoljima 232/3 i 232/4 nedovoljno poznavanje strukturnih značajki stijenske mase, te je potrebno korigirati ulazne parametre Kuz-Ram modela kako bi se ostvarila što bolja prognoza fragmentacije stijenske mase. U obzir je potrebno uzeti i moguće pogreške koje se javljaju prilikom fotografske analize razdiobe fragmenata odminirane stijenske mase, kao što je npr. tendencija umanjivanja veličine fragmenata stijene. Može se zaključiti da krivulje KCO modela pokazuju relativno dobro poklapanje s krivuljama dobivenim aplikacijom „WipFrag“ za fragmentaciju u odnosu na krivulje Kuz-Ram modela.

7. LITERATURA

BOŽIĆ, B., 1998a. Miniranje u rudarstvu, graditeljstvu i geotehnici. Varaždin: Geotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

BOŽIĆ B., 1998b. Metode za predviđanje i analizu fragmentacije odminirane stijenske mase. Mineral, rujan 1998, str. 20-23.

BOŽIĆ B., STRELEC S., 2000. Analiza odminirane mase sijanjem i obradom slike. Građevinar 53 (2001) 3, str. 139-145.

CUNNINGHAM, C. V. B., 1987. Fragmentation estimations and the Kuz-Ram model – for years on. 2nd International Symposium on Rock Fragmentation in Blasting. Keystone, Colorado.

CUNNINGHAM, C. V. B., 2005. The Kuz-Ram fragmentation model – 20 years on. Brighton Concerence Proceedings (2005), str. 201-210.

HRŽENJAK, P., 2009. Mehanika stijena 1 – predavanja. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet. http://rgn.hr/~phrzen/mehanika_stijena_I.htm

HRŽENJAK, P., 2009. Mehanika stijena 2 – predavanja. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet. http://rgn.hr/~phrzen/mehanika_stijena_II.htm

KRSNIK, J., 1989. Miniranje. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

KUZNETSOV, V. M., 1973. The mean diameter of the fragments formed by blasting rock. Soviet Mining Science, V9, str. 144-148.

OUCHTERLONY, F., 2005. The Swebrec function: linking fragmentation by blasting and crushing, Swedish blasting research centre.

STRELEC, S., 2001. Optimalizacija miniranja u svrhu dobivanja željene fragmentacije odminirane stijenske mase. Disertacija. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

STRELEC, S., BOŽIĆ B., PRANJIĆ J., 2002a. Fotografsko određivanje razdiobe fragmenata u stijenskoj masi (I. dio). Mineral, 2/2002 Travanj, str. 50-53.

STRELEC, S., BOŽIĆ B., PRANJIĆ J., 2002b. Fotografsko određivanje razdiobe fragmenata u stijenskoj masi (II. dio). Mineral, 3/2002 Lipanj, str. 34-38.

ŠKRLEC, V., DOBRILOVIĆ, M., BOHANEK, V., 2014. Teorije loma stijene eksplozivom. Zagreb: Rudarsko-geološko naftni fakultet.

VENKATESH, M., 2010. Limestone rock fragmentation analysis using WipFrag. Rourkela, National institute of technology.